



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

André Timóteo Gouveia e Freitas

EVOLUÇÃO DO SISTEMA ELECTROPRODUTOR E ESTUDO
DO RECURSO SOLAR COM BASE NOS REGISTOS DAS
ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS NO
PERÍODO DE 2005 A 2015 – ILHA DA MADEIRA
ESTÁGIO CURRICULAR NO LABORATÓRIO REGIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

Nome do Curso de Mestrado
Sistemas de Energias Renováveis

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Duarte Alves

E coorientação do
Doutor José Carlos Magro Esteves

Fevereiro de 2016



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

AUTOR:

ANDRÉ TIMÓTEO GOUVEIA E FREITAS

CONSTITUIÇÃO DO JÚRI

PRESIDENTE: PROFESSOR DOUTOR JOÃO ABRANTES (ESTG-IPVC)

VOGAL ARGUENTE: PROFESSOR DOUTOR PAULO COSTA (ESTG-IPVC)

VOGAL: PROFESSOR DOUTOR DUARTE ALVES (ESTG-IPVC)

AGRADECIMENTOS

A realização deste relatório foi possível graças ao contributo de um conjunto de pessoas e entidades, às quais, quero deixar o meu sincero e reconhecido agradecimento.

Ao meu orientador do meu estágio académico, Professor Doutor Duarte Nuno Malheiro Alves, pela disponibilidade, sugestões e orientação prestadas ao longo do desenvolvimento deste relatório.

Ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC), por me ter acolhido nas suas instalações e permitido realizar o meu estágio curricular. Ao meu orientador de estágio, Doutor José Carlos Magro Esteves, pelo apoio e esclarecimentos prestados durante a realização do meu estágio.

Ao Eng.º António Olim, Diretor do Departamento de Hidráulica e Energias Renováveis (DHER) do LREC por todo o apoio, incentivo e interligação com a Delegação Regional do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA).

A todos os elementos do DHER - LREC, pelo acompanhamento nas visitas de campo e companheirismo: Sr. Agostinho Gouveia, Eng.º Carlos, Sr. Eleutério Faria, Sr. Jorge Martins, Eng.ª Lisandra, Sr. Pedro Carreira e a Eng.ª Sara.

Ao Doutor Victor Prior, diretor da Delegação Regional do Instituto Português do Mar e da Atmosfera por toda a ajuda e disponibilidade na cedência dos registos da radiação solar.

À Coordenadora do Mestrado em Sistemas de Energias Renováveis Professora Doutora Preciosa Pires, pela disponibilidade, preocupação e apoio.

Aos meus colegas de Licenciatura e Mestrado, em especial à Cristina Campos, João Malheiro, Lorrán Leite, Márcio Borges, Rui Franco e Valdemar Leiras, por todo o apoio prestado durante este período da minha formação.

À Família Leiras, por me ter acolhido na sua casa, durante o período de finalização, entrega e defesa deste relatório.

Aos meus amigos, pelo ânimo, alento, companheirismo e carinho que sempre me deram.

Um agradecimento final aos meus pais e irmãos, pelo constante apoio, motivação, aconselhamento, encorajamento e por tudo o que me proporcionaram, ao longo de toda a minha formação pessoal.

RESUMO

A primeira parte deste relatório de estágio aborda a evolução do Sistema Electroprodutor da ilha da Madeira (SEPM), na última década, e, as estratégias e ações a implementar para cumprir as metas definidas para 2020, no Plano de Ação para a Energia Sustentável (PAES).

Entre os anos de 2005 e 2015, verificou-se um crescimento na representatividade das fontes de energia renováveis (FER) no SEPM, passando dos 15,7% (136,5 GWh) para os 25,7% (210,8 GWh) da energia elétrica total produzida e, por conseguinte, uma redução nas fontes de energia não renováveis, de 727,4 GWh para 617,4 GWh. A evolução das FER na última década caracteriza-se pelo aumento da potência eólica instalada, de 10 MW para 45,1 MW, do surgimento da fotovoltaica, atualmente com 20 MW, da potência instalada constante do Sistema de Valorização Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos (SVERSU) de 8 MW e, pela redução da potência hídrica instalada, de 74 MW para os atuais 50,7 MW. Em 2014, a introdução do gás natural, na Central Térmica da Vitória, permitiu potenciar a adaptação do SEPM às metas de redução das emissões de CO₂e. Em 2015 verificou-se uma redução das emissões CO₂e em cerca de 28%, passando de 526.241 tCO₂e para 380.817 tCO₂e, correspondendo a um fator de emissão específico atual de 460 gCO₂/KWh.

A segunda parte deste relatório caracteriza a distribuição geográfica da radiação solar no arquipélago da Madeira através dos registos da Irradiação Solar Global Diária (ISGD) das estações meteorológicas automáticas (EMAs), do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) e do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA).

Face aos resultados, verifica-se que o recurso solar no arquipélago da Madeira é muito variável, em particular na ilha da Madeira, uma vez que a orografia bastante acidentada, bem como a exposição aos ventos predominantes de Norte, fazem com que na ilha existam diversos microclimas que influenciam a radiação solar que chega à superfície. A análise aos registos das duas redes de EMAs permitiu concluir que mais de 60% apresentam uma disponibilidade anual do recurso solar superior a 1500 kWh/m². Após a realização dos estudos comparativos da ISGD das EMAs e a correspondente ISGD, na base de dados da ferramenta PVGIS e no *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira* foi possível validar e detetar o funcionamento incoerente de duas das vinte e sete EMAs analisadas. O curto período de funcionamento da EMA do Trapiche, associado à sua elevada percentagem de lacunas de dias, característico da rede LREC, não permitiu a realização de um estudo detalhado aos seus registos. No entanto, relativamente à EMA do Parque Ecológico do Funchal foi possível detetar uma anomalia no seu sensor de radiação solar, que se traduz numa quebra superior a 20% na quantificação da ISGD. Assim, no global do estudo da radiação solar, estão associadas incertezas aos registos, sendo que, nas EMAs devem-se à inexistência de tratamento dos registos e à falta de recalibração dos sensores, e, nos dois modelos de previsão utilizados, devem-se às características da metodologia utilizada na sua construção, traduzindo-se em ambos os casos numa sobrevalorização do recurso solar.

Na terceira parte do relatório são tecidas algumas considerações acerca das operações de manutenção de alguns sistemas fotovoltaicos isolados visitados. Foi possível verificar que, após uma década de funcionamento, a maioria dos sistemas fotovoltaicos encontram-se degradados e a necessitar urgentemente de intervenção.

Palavras-chave: sistema electroprodutor; irradiação solar global; sistemas fotovoltaicos isolados; termografia.

ABSTRACT

The first part of the report discusses the evolution of the Madeira Island Power System (MIPS) in the last decade and presents the strategies and actions to implement in order to meet the targets set for 2020 in the Sustainable Energy Action Plan.

Between 2005 and 2015 there was an increase of renewable energy sources (RES) in MIPS, from 15,7% (136,5 GWh) to 25,7% (210,8 GWh) of total electricity produced, and a reduction in non-renewable energy sources, from 727,4 GWh to 617,4 GWh. The evolution of RES in the last decade benefits from: (1st) the increase in installed wind power capacity, from 10 MW to 45,1 MW; (2nd) the introduction of photovoltaic systems, now with 20 MW of installed power; (3rd) the Municipal Solid Waste Energy Recovery System with 8 MW installed power, and (4th) the hydric installed power reduction from 74 MW to 50,7 MW. In 2014 the conversion of Vitoria Thermal power plant to natural gas allowed the adaptation of MIPS to reduce CO₂e emissions and achieve the demanded targets. In 2015 there was a reduction in CO₂e emissions of around 28%, from 526.241 tCO₂e to 380.817 tCO₂e, corresponding to a specific emission factor of 460 gCO₂/KWh.

The second part of the report features the geographical distribution of the solar radiation in the archipelago of Madeira. This distribution was based on the records analysis of the Daily Global Solar Irradiation (DGSI) collected from the automatic weather stations (AWS's) of the Regional Civil Engineering Laboratory (LREC) and of the Portuguese Sea and Atmosphere Institute (IPMA).

Given the results, it appears that the solar resource in the archipelago of Madeira is very variable, particularly in the Madeira Island, since the very rugged terrain as well as the exposure to prevailing winds from the north results in the formation of many microclimates that influence the solar radiation reaching the surface. The records analysis of the two AWS's networks concluded that more than 60% have an annual solar resource above 1500 kWh/m². After conducting comparative studies of DGSI in AWS's and the corresponding DGSI in PVGIS tool database, as well as the consultation of the Atlas of Global Solar Radiation of the Madeira Archipelago (Portugal), it was possible to validate and detect inconsistent operation of two of the twenty seven analyzed AWS's. The short period of operation of the Trapiche AWS associated with its high percentage of daily gaps, a characteristic of the AWS LREC network, did not allowed to carry out a detailed study of its records. However, for the AWS of the Ecological Park of Funchal it was possible to detect an anomaly in its solar radiation sensor, which resulted in a breakdown above 20% in the quantification of the DGSI. In summary, the overall study of the solar radiation is associated with some uncertainties of the records, resulting from the lack of maintenance and recalibration of the sensors located in the AWS's. On the other hand, the methodology applied in the construction of the two prevision models show an overvaluation of the archipelago solar resource.

The third part of the report presents some considerations about the maintenance of the visited autonomous photovoltaic systems. It was possible to verify that after a decade of operation most photovoltaic systems are degraded and require urgent intervention.

Keywords: power system; global solar irradiation; isolated photovoltaic systems; thermography.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
NOMENCLATURA	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2 SISTEMA ELECTROPRODUTOR DA ILHA DA MADEIRA.....	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.2 PRINCIPAIS INFRAESTRUTURAS DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS DO SEPM	8
2.2.1 CENTRAL HIDROELÉTRICA DA CALHETA I (CALHETA DE VERÃO)	9
2.2.2 CENTRAL HIDROELÉTRICA DA CALHETA II (CALHETA DE INVERNO)	9
2.2.3 CENTRAL MINI-HÍDRICA DO LOMBO BRASIL	10
2.2.4 CENTRAL HIDROELÉTRICA DOS SOCORRIDOS	10
2.2.5 CENTRAL HIDROELÉTRICA DA RIBEIRA DA JANELA	10
2.2.6 CENTRAL HIDROELÉTRICA DA SERRA DE ÁGUA.....	11
2.2.7 CENTRAL HIDROELÉTRICA DA FAJÃ DA NOGUEIRA	11
2.2.8 CENTRAL MINI-HÍDRICA DA FAJÃ DOS PADRES	11
2.2.9 CENTRAL MINI-HÍDRICA DA TERÇA	12
2.2.10 CENTRAL MINI-HÍDRICA DE SANTA QUITÉRIA	12
2.2.11 PROJETO DE AMPLIAÇÃO DO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DA CALHETA ...	12
2.2.12 PARQUE EÓLICO DO CANIÇAL	13
2.2.13 PARQUE EÓLICO DA BICA DA CANA (PAUL DA SERRA)	14
2.2.14 PARQUE EÓLICO DO PAUL DA SERRA I.....	14
2.2.15 PARQUE EÓLICO DO PAUL DA SERRA II.....	14
2.2.16 PARQUE EÓLICO DA FONTE DO JUNCAL	14
2.2.17 PARQUE EÓLICO DO LOIRAL	15

2.2.18	PARQUE EÓLICO LOIRAL II	15
2.2.19	PARQUE EÓLICO DAS PEDRAS	15
2.2.20	PARQUE EÓLICO QUINTA DO LORDE	15
2.2.21	PROJETOS PARA FUTUROS PARQUES EÓLICOS	16
2.2.22	PARQUE FOTOVOLTAICO DO CANIÇAL	16
2.2.23	PARQUE FOTOVOLTAICO DO LOIRAL	17
2.2.24	PARQUE FOTOVOLTAICO DO PAUL DA SERRA	17
2.2.25	SISTEMA DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	17
2.2.26	PROJETO DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA ENERGIA GEOTÉRMICA ESTIMULADA	18
2.3	PRINCIPAIS INFRAESTRUTURAS DE FONTES DE ENERGIA NÃO RENOVÁVEIS DO SEPM ..	19
2.3.1	CENTRAL TÉRMICA DA VITÓRIA (CTV).....	19
2.3.2	CENTRAL TÉRMICA DO CANIÇAL (CTC).....	19
2.4	EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA MADEIRA.....	20
2.4.1	PANORAMA DA ENERGIA RENOVÁVEL NO SEPM.....	21
2.4.2	EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NA MADEIRA ENTRE 2005 E 2015 ...	22
2.5	EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO	22
2.5.1	EMISSÕES ESPECÍFICAS ANUAIS DE DIÓXIDO DE CARBONO	23
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	25
3	ESTUDO DA RADIAÇÃO SOLAR NA ILHA DA MADEIRA	26
3.1	INTRODUÇÃO	26
3.2	CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS SOBRE A RADIAÇÃO SOLAR	26
3.2.1	RELAÇÃO ENTRE OS FACTORES ASTRONÓMICOS E METEOROLÓGICOS QUE INFLUENCIAM A RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE	27
3.2.2	QUANTIFICAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR	35
3.2.3	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR.....	37
3.2.4	DADOS HISTÓRICOS DOS RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS.....	40
3.2.5	MODELOS DE PREVISÃO DA RADIAÇÃO SOLAR	43

3.3	QUANTIFICAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO SOLAR NA REDE DE EMAS DA ILHA DA MADEIRA.....	55
3.3.1	CLIMA DA ILHA DA MADEIRA	55
3.3.2	REDE DE EMAS DO LREC.....	56
3.3.3	EQUIPAMENTOS TÉCNICOS DA REDE DE EMAS LREC	60
3.3.4	REDE DE EMAS DO IPMA.....	63
3.3.5	EQUIPAMENTOS TÉCNICOS DA REDE DE EMAS IPMA	64
3.4	METODOLOGIA DO TRATAMENTO E ANÁLISE DOS REGISTOS DE RADIAÇÃO SOLAR DA ILHA DA MADEIRA	65
3.4.1	METODOLOGIA PARA OS REGISTOS DA REDE DE EMAS LREC.....	65
3.4.1	SÍNTESE DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS LREC	67
3.4.2	ANÁLISE GRÁFICA DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS LREC	67
3.4.3	METODOLOGIA DA ANÁLISE DOS REGISTOS REDE DE EMAS IPMA.....	76
3.4.4	SÍNTESE DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS IPMA	77
3.4.5	ANÁLISE GRÁFICA DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS IPMA	78
3.4.6	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS REGISTOS, DAS EMAS, DA REDE LREC E OS DA REDE IPMA.....	88
3.5	ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS REGISTOS DAS EMAS E A BASE DE DADOS DO PVGIS.....	94
3.5.1	METODOLOGIA DA BASE DE DADOS DA FERRAMENTA PVGIS.....	94
3.5.2	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	95
3.5.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	99
3.6	ESTUDO COMPARATIVO RELATIVAMENTE AO <i>ATLAS DA RADIAÇÃO SOLAR</i>	101
3.6.1	METODOLOGIA DO <i>ATLAS DA RADIAÇÃO SOLAR</i>	101
3.6.2	METODOLOGIA UTILIZADA NESTE ESTUDO COMPARATIVO.....	105
3.6.3	RESULTADOS.....	106
3.6.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	113
4	MANUTENÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS E DE FINS MÚLTIPLOS.....	116
4.1	INTRODUÇÃO	116

4.2	MANUTENÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	117
4.2.1	TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....	117
4.2.2	TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO DOS BANCOS DE BATERIAS	119
4.2.3	TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE POTÊNCIA.....	120
4.2.4	A IMPORTÂNCIA DA TERMOGRAFIA NO APOIO À VERIFICAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS	121
4.3	CARATERIZAÇÃO DA CÂMERA TERMOGRÁFICA UTILIZADA	122
4.3.1	CARATERIZAÇÃO DO SOFTWARE FLIR TOOLS.....	123
4.4	INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS ANALISADAS.....	123
4.4.1	SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DO POSTO FLORESTAL DOS ESTANQUINHOS	124
4.4.2	SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DO POSTO FLORESTAL DA COVA GRANDE	125
4.4.3	SISTEMA SOLAR DE FINS MÚLTIPLOS DA QUINTA PEDAGÓGICA DOS PRAZERES ..	127
4.4.4	SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DA CASA DE ABRIGO DO PICO RUIVO	128
4.4.5	SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DA CASA DO BURRO	129
4.5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	130
5	CONCLUSÕES.....	131
5.1	SISTEMA ELECTROPRODUTOR DA ILHA DA MADEIRA.....	131
5.2	ESTUDO DA RADIAÇÃO SOLAR NO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA	132
5.3	MANUTENÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS	136
5.4	TRABALHOS FUTUROS	137
6	BIBLIOGRAFIA.....	138
7	ANEXOS.....	144
A.1	ANÁLISE DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS LREC	144
A.2	ANÁLISE DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS IPMA	144
A.3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS REGISTOS DAS DUAS REDES DE EMAS.....	144
A.4	ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS REGISTOS DAS EMAS E OS DA BASE DE DADOS PVGIS.....	144
A.5	ESTUDO COMPARATIVO RELATIVAMENTE AO <i>ATLAS DA RADIAÇÃO SOLAR</i>	144

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Total das emissões anuais antropogénicas por grupos de GEE entre 1970 e 2010.	5
Figura 2.2 – Emissões de gases de efeito de estufa por setores económicos.	6
Figura 2.3 – Evolução das emissões nacionais de GEE.....	6
Figura 2.4 – Emissões setoriais em CO ₂ e (2013).....	7
Figura 2.5 - Localização das centrais elétricas do arquipélago da Madeira.	8
Figura 2.6 - Localização esquemática das centrais hidroelétricas na ilha da Madeira.....	9
Figura 2.7 – Central Hidroelétrica da Calheta I.....	9
Figura 2.8 - Central Hidroelétrica da Calheta II.	9
Figura 2.9 – Central Mini-Hídrica do Lombo Brasil.	10
Figura 2.10 - Central Hidroelétrica da Ribeira dos Socorridos.....	10
Figura 2.11 – Central Hidroelétrica da Ribeira da Janela.	11
Figura 2.12 - Central Hidroelétrica da Serra de Água.	11
Figura 2.13 - Central Hidroelétrica da Fajã da Nogueira.	11
Figura 2.14 – Central Mini-Hídrica de Santa Quitéria.	12
Figura 2.15 – Aspeto final da Barragem do Pico da Urze.	13
Figura 2.16 – Localização do parque eólico do Caniçal.....	13
Figura 2.17 – Parque Eólico do Paul da Serra I.....	14
Figura 2.18 – Parque eólico do Loiral II.....	15
Figura 2.19 – Parque Eólico das Pedras.	15
Figura 2.20 – Parque Eólico da Quinta do Lorde.	16
Figura 2.21 – Parque fotovoltaico do Caniçal.....	16
Figura 2.22 – Parque Fotovoltaico do Loiral.....	17
Figura 2.23 – Aspeto do Parque fotovoltaico do Paul da Serra.	17
Figura 2.24 – Aspeto da Incineradora da SVERSU da Meia Serra.	17
Figura 2.25 – Esquematização do funcionamento de uma central de geotermia estimulada.	18
Figura 2.26 – Central Térmica da Vitória (CTV).	19
Figura 2.27 – Central Térmica privada do Caniçal (CTC)	20
Figura 2.28 – Evolução da produção e balanço de energia elétrica na ilha da Madeira por fonte de energia.	21
Figura 2.29 - Evolução da potência instalada (MW) por fonte de energia primária na ilha da Madeira.	21
Figura 2.30 - Evolução das fontes de energia renováveis na ilha da Madeira, 2005-2015.	22
Figura 2.31 – A evolução da eletricidade na ilha da Madeira numa década (2005 -2015).	22
Figura 2.32 - Evolução das emissões de CO ₂ no SEPM da ilha da Madeira entre 2005 e 2015 por fonte.....	23
Figura 2.33 – Evolução das emissões específicas na RAM.	24
Figura 2.34 – Emissões específicas anuais de CO ₂ dos comercializadores.	24

Figura 3.1 – Relação Terra – Sol.	26
Figura 3.2 – Espectro da radiação eletromagnética.	27
Figura 3.3 – Variação da Radiação solar acima da atmosfera ao longo do ano.....	28
Figura 3.4 – A declinação solar e as quatro estações.	29
Figura 3.5 – Variação da declinação ao longo do ano.....	29
Figura 3.6 – Variação anual da altitude solar no hemisfério norte.....	30
Figura 3.7 – Curva de correção do tempo.....	31
Figura 3.8 - Caminho diário aparente do sol no céu do nascer ao pôr-do-sol.....	31
Figura 3.9 – Diagrama de ângulos solares. Adaptado: (Sabbagh, 1977).	32
Figura 3.10 – Fenómeno de difusão de Rayleigh e Mie.	34
Figura 3.11 – Coeficientes de Massa de Ar (AM).....	35
Figura 3.12 – Esquema de uma termopilha de um detetor térmico.....	36
Figura 3.13 – Ponte de Wheatstone, conexões elétricas de um bolómetro.	36
Figura 3.14 – Pireliómetro e seguidor solar da Kipp & Zonen.	37
Figura 3.15 – Piranómetro Kipp & Zonen.....	37
Figura 3.16 – Pirgeómetro Kipp & Zonen.....	38
Figura 3.17 – Pirradiómetro ou Radiómetro “Líquido” Kipp & Zonen.	38
Figura 3.18 – Piranómetro com difusor/ esfera integradora.	38
Figura 3.19 – Classificação do modelo de previsão baseado na resolução espacial e temporal.	44
Figura 3.20 – Imagem total do céu (esquerda) e vetores movimento das nuvens (direita).....	46
Figura 3.21 – Esquema do método Heliosat2 a partir de imagens do satélite METEOSAT.	47
Figura 3.22 – Orografia da ilha da Madeira.....	55
Figura 3.23 – Explicação do efeito de formação das nuvens e nevoeiros orográficos na ilha da Madeira.	56
Figura 3.24 – Localização das estações da rede de EMAs LREC no mapa da ilha da Madeira.....	57
Figura 3.25 – EMA da Bica da Cana – Piranómetro Tipo SC.	58
Figura 3.26 – EMA do Pico Verde – Piranómetro Tipo SC.	58
Figura 3.27 – EMA da Encumeada – Piranómetro Tipo SC e C.	58
Figura 3.28 – EMA do LREC – Piranómetros Tipo SC, A e C.....	59
Figura 3.29 – EMA de Machico – Piranómetros Tipo SC.	59
Figura 3.30 – EMA do Parque Ecológico do Funchal – Piranómetro tipo SC.	59
Figura 3.31 – EMA do Porto Moniz – Piranómetro tipo SC.	59
Figura 3.32 – EMA da Casa Florestal dos Prazeres – Piranómetro tipo SC.....	59
Figura 3.33 – EMA do Viveiro Florestal do Pico das Pedras – Santana – Piranómetros tipo SC.	59
Figura 3.34 – EMA do Trapiche – Piranómetro tipo SC.....	60
Figura 3.35 – Disposição dos sensores que medem os parâmetros meteorológicos das EMAs.....	60
Figura 3.36 - Localização das estações da rede de EMAs IPMA no mapa da ilha da Madeira.....	63
Figura 3.37 – Distribuição da rede de EMAs LREC no mapa da ilha da Madeira.	68
Figura 3.38 – Variação anual da ISGD, em Wh/m ² .dia, nas EMAs da rede LREC.	68

Figura 3.39 - Enquadramento das EMAs LREC do concelho da Calheta no mapa.	69
Figura 3.40 – Variação anual da ISGD, em Wh/m ² .dia, nas EMAs LREC do concelho da Calheta.	69
Figura 3.41 – Enquadramento das EMAs LREC do concelho do Funchal no mapa.	71
Figura 3.42 – Variação anual da ISGD, em Wh/m ² .dia, nas EMAs LREC do concelho do Funchal.	71
Figura 3.43 – Enquadramento da EMA da rede LREC à cota mais elevada no mapa.	73
Figura 3.44 – Enquadramento da EMA da rede LREC à cota mais baixa no mapa.	74
Figura 3.45 – Variação anual da ISGD, em Wh/m ² .dia, nas EMAs localizadas nos extremos de cota (altitude).	74
Figura 3.46 – Enquadramento da EMA LREC do concelho do Porto Moniz no mapa.	75
Figura 3.47 - Enquadramento das EMAs LREC dos concelhos de Santana e São Vicente no mapa.	75
Figura 3.48 - Variação anual da ISGD, em Wh/m ² .dia, nas EMAs localizadas no norte da ilha.	76
Figura 3.49 – Distribuição geográfica das estações da rede de EMAs IPMA no mapa.	78
Figura 3.50 – Variação anual da ISGD em Wh/m ² .dia das EMAs IPMA do lado sul da ilha.	78
Figura 3.51 – Variação anual da ISGD em Wh/m ² .dia das EMAs IPMA do lado norte da ilha.	78
Figura 3.52 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho do Funchal no mapa.	79
Figura 3.53 – Variação anual da ISGD em Wh/m ² .dia das EMAs IPMA do concelho do Funchal.	80
Figura 3.54- Enquadramento das EMAs IPMA do concelho Machico no mapa.	81
Figura 3.55 – Variação anual da ISGD em Wh/m ² .dia das EMAs IPMA do concelho de Machico.	81
Figura 3.56 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho de Câmara de Lobos no mapa.	82
Figura 3.57 – Variação anual da ISGD em Wh/m ² .dia da EMA IPMA do concelho de Câmara de Lobos.	82
Figura 3.58 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho da Ponta do Sol no mapa.	83
Figura 3.59 – Variação anual da ISGD em Wh/m ² .dia das EMAs IPMA do Concelho da Ponta do Sol.	83
Figura 3.60 - Enquadramento da EMA IPMA do concelho da Calheta no mapa.	84
Figura 3.61 – Variação anual da ISGD em Wh/m ² .dia da EMA IPMA do Concelho da Calheta.	84
Figura 3.62 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho do Porto Moniz no mapa.	85
Figura 3.63 – Variação anual da ISGD em Wh/m ² .dia das EMAs IPMA do concelho do Porto Moniz.	85
Figura 3.64 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho de São Vicente no mapa.	86
Figura 3.65 – Variação anual da ISGD em Wh/m ² .dia das EMAs IPMA do Concelho de São Vicente.	87
Figura 3.66 – Variação anual da ISGD em Wh/m ² .dia das EMAs IPMA do concelho de Santana.	87
Figura 3.67 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho de Santana no mapa.	88
Figura 3.68 - Enquadramento das EMAs LREC e IPMA do concelho Funchal no mapa.	89
Figura 3.69 - Variação anual da ISGD das EMAs LREC e IPMA do concelho do Funchal.	89
Figura 3.70 – Variação anual da ISGD das EMAs LREC e IPMA do concelho do Funchal entre 01/15 a 08/15.	89
Figura 3.71 – Análise da variação anual da ISGD, entre 2006 e 2010, das EMAs do concelho do Funchal.	91
Figura 3.72 – Sensor de radiação desposicionado na EMA de Machico entre 02/2014 e 04/2015.	93
Figura 3.73 – Área da Terra coberta pelo satélite Meteosat-6 nas imagens em modo Full Rapid Scan Service.	102
Figura 3.74 – Malha de píxeis dos três cortes parciais a 0° de longitude e a 10° de longitude Este.	102

Figura 3.75 - Zonas geográficas onde o arquipélago da Madeira foi dividido no processo de validação da irradiação.	105
Figura 3.76 – Localização das EMAs do IPMA e do LREC no Atlas da Radiação Solar.	106
Figura 4.1 – Exemplo de medição da tensão de circuito aberto de um sistema energético fotovoltaico.	118
Figura 4.2 - Exemplo de medição da corrente de curto-circuito de um sistema energético fotovoltaico.	118
Figura 4.3 – Identificação de anomalias nas células/módulos a partir de uma curva I-V.	119
Figura 4.4 - Exemplo de medição da tensão de circuito aberto de um banco de baterias.	120
Figura 4.5 – Influência do ângulo de incidência na variação da emissividade.....	121
Figura 4.6 – Ângulos de manuseamento da Câmara termográfica captura de imagens.	122
Figura 4.7 – Câmara Termográfica FLIR P640.....	122
Figura 4.8 – Ambiente de trabalho da ferramenta FLIR Tools a uma imagem termográfica.	123
Figura 4.9 – Instalação fotovoltaica de fornecimento de energia ao Posto Florestal dos Estanquinhos.....	124
Figura 4.10 - Constituintes da nova/antiga instalação fotovoltaica isolada do Posto Florestal dos Estanquinhos.....	124
Figura 4.11 – Células fotovoltaicas quebradas na instalação dos Estanquinhos.	124
Figura 4.12 – Célula fotovoltaica danificada e consequente ponto quente na instalação dos Estanquinhos.	125
Figura 4.13 – Detecção visual e termográfica das células fotovoltaicas danificadas na instalação PV dos Estanquinhos.....	125
Figura 4.14 – Imagem termográfica frontal e traseira da instalação fotovoltaica dos Estanquinhos.....	125
Figura 4.15 – Instalação fotovoltaica isolada de fornecimento de energia elétrica ao Posto Florestal da Cova Grande.	126
Figura 4.16 – Constituintes da instalação fotovoltaica isolada da Cova Grande.	126
Figura 4.17 - Imagem termográfica frontal e traseira de uma célula a analisar na Cova Grande.....	126
Figura 4.18 – Detecção de má ligação entre módulos fotovoltaicos na instalação da Cova Grande.	127
Figura 4.19 - Instalação fotovoltaica de fornecimento de energia ao Secador Solar da Quinta P. dos Prazeres.	127
Figura 4.20 – Inspeção termográfica às instalações de miniprodução da Quinta Pedagógica dos Prazeres.	127
Figura 4.21 – Regulador de velocidade para motores CA 1/2CV 375W 220V oxidado.....	128
Figura 4.22 – Inspeção ao sistema térmico de termossifão da Quinta Pedagógica dos Prazeres.	128
Figura 4.23 – Sistema fotovoltaico isolado de fornecimento de energia à Casa de Abrigo do Pico Ruivo....	128
Figura 4.24 – Detecção da falha, correção e verificação do bom funcionamento do inversor.....	129
Figura 4.25 – Sistema fotovoltaico isolado de fornecimento de energia elétrica à Casa do Burro.	129
Figura 4.26 – Painéis fotovoltaicos afetados pelos incêndios de 2010 e 2012 na Casa do Burro.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais valores do Potencial de Aquecimento Global (GWP) relativo ao CO ₂	4
Tabela 2.2 – Objetivos, metas e resultados esperados em 2020 com a implementação do PAES.....	8
Tabela 2.3 - Caraterização dos parques eólicos no arquipélago da Madeira.....	13
Tabela 3.1 – Algumas categorias importantes do espectro da irradiação solar.....	27
Tabela 3.2 – Fatores de ponderação aplicados a distribuições cumulativas.....	41
Tabela 3.3 – Modelos de previsão numérica globais.....	49
Tabela 3.4 – Modelos de previsão numérica locais.....	49
Tabela 3.5 – Descrição da localização das estações da rede de EMAs LREC.....	58
Tabela 3.6 – Caraterização de uma Estação Meteorológica Automática.....	60
Tabela 3.7 - Caraterísticas dos sensores de radiação do tipo A da rede de EMAs.....	61
Tabela 3.8 – Caraterísticas dos sensores de radiação do tipo C da rede de EMAs.....	62
Tabela 3.9 – Caraterísticas dos Sensores de Radiação do tipo SC da rede de EMAs.....	62
Tabela 3.10 – Descrição da localização das estações da rede EMAs IPMA.....	64
Tabela 3.11 - Caraterísticas dos sensores de radiação do tipo B da rede de EMAs IPMA.....	65
Tabela 3.12 - Caraterísticas dos sensores de radiação do tipo C da rede de EMAs IPMA.....	65
Tabela 3.13 – Número de meses utilizados para o cálculo da média mensal da ISGD em cada EMA da rede LREC.....	67
Tabela 3.14 – Número de meses utilizados para o cálculo da Média Mensal da ISGD em cada EMA da rede IPMA.....	77
Tabela 3.15 – Variação anual da ISGD das EMAs LREC na base de dados PVGIS.....	95
Tabela 3.16 - Variação anual da ISGD das EMAs IPMA na base de dados PVGIS.....	96
Tabela 3.17 – Análise comparativa entre a média anual da ISGD das EMAs LREC e do PVGIS.....	96
Tabela 3.18 - Análise comparativa entre a média anual da ISGD das EMAs IPMA e do PVGIS.....	96
Tabela 3.19 - EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD inferior à correspondente no PVGIS para o local, com desvio superior a 1000 Wh/m ² .dia.....	97
Tabela 3.20 - EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD inferior à correspondente no PVGIS para o local, com desvio inferior a 500 Wh/m ² .dia.....	98
Tabela 3.21 – EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD, superior à correspondente no PVGIS para o local, com desvio inferior a 1000 Wh/m ² .dia.....	98
Tabela 3.22 – Variação anual da ISGD das estações utilizadas na normalização do Atlas da Radiação Solar.....	104
Tabela 3.23 – Estações meteorológicas do IPMA utilizadas na elaboração do Atlas da Radiação Solar.....	104
Tabela 3.24 – Análise comparativa da média anual da ISGD entre os registos da rede de EMAs LREC e o intervalo correspondente no Atlas da Radiação Solar.....	106

Tabela 3.25 – Análise comparativa da média anual da ISGD entre os registos da rede de EMAs IPMA e o intervalo correspondente no Atlas da Radiação Solar.....	107
Tabela 3.26 – EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD inferior ao intervalo correspondente no Atlas da Radiação Solar para o local, com um desvio superior a 1000 Wh/m ² .dia.	107
Tabela 3.27 - EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD, superior a um dos limites do intervalo do Atlas da Radiação Solar para o local, com um desvio inferior a 500 Wh/m ² .dia.....	109
Tabela 3.28 – EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD, menor que o intervalo correspondente no Atlas da Radiação Solar para o local, com um desvio inferior a 1000 Wh/m ² .dia.....	110
Tabela 4.1 – Caraterísticas dos sistemas híbridos isolados instalados no âmbito do Projeto PAUER do LREC.	117
Tabela 4.2 – Relação entre a capacidade e a tensão das baterias ácidas.	120
Tabela 4.3 – Caraterísticas da Câmara Termográfica FLIR P640.....	123

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Cálculo do fator de emissão de CO ₂	18
Equação 2 – Radiação Solar incidente no topo da atmosfera.	28
Equação 3 – Meridiano do fuso horário local.....	30
Equação 4 – Equação do tempo E ₀ T.....	30
Equação 5 – Equação de correção de longitude (LC).....	30
Equação 6 – Tempo Solar Aparente (AST).....	31
Equação 7 – Ângulo horário do local.	31
Equação 8 – Ângulo de altitude solar (α).	32
Equação 9 – Ângulo de azimuth solar (z).	32
Equação 10 – Massa de ar padrão.....	34
Equação 11 – Índice de claridade.	51
Equação 12 – Índice de céu limpo.	51
Equação 13 – Root Mean Square error (RMSE).....	55
Equação 14 – Mean Bias Error (bias).	55

NOMENCLATURA

ABREVIATURAS E SIGLAS

AFOLU	Agriculture, Forestry and Other Land Use	CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
AFWA	Air Force Weather Agency		
AI	Inteligência Artificial	CMAF/UL	Centro de Matemática e Aplicações Fundamentais (CMAF) da Universidade de Lisboa
AIE	Atlantic Islands Electricity S.A.		
AM	Massa de Ar	COP21	United Nations conference on climate change, Paris, December of 2015
ANFIS	Adaptive Neuro Fuzzy Inference System		
APREN	Associação Portuguesa De Energias Renováveis	CPV	Sistemas Fotovoltaicos de Concentração
AR	Auto Regressive Model	CSP	Centrais Termosolares de Concentração
ArcGis	Sistema de Informação Geográfica (GIS)	CSV	“Comma Separated Values” File Format
AREAM	Agência Regional da Energia e Ambiente da Região Autónoma da Madeira	CTC	Central Térmica do Caniçal
ARIMA	Auto Regressive Integrated Moving Average Model	CTV	Central Térmica da Vitória
ARIMAX	Auto Regressive Integrated Moving Average with Exogenous Input Model	DHER	Departamento de Hidráulica e Energias Renováveis
ARMA	Auto Regressive Moving Average	DIA	Declaração de Impacte Ambiental
ARMAX	Autoregressive Moving Average Exogenous	DL	Decreto-lei
ASHRAE	American Society of Heating Refrigeration and Air-Conditioning Engineers	DLR	German Aerospace Center
AST	Tempo Solar Aparente	DM	Data Mining
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer	DNI	Direct Normal Irradiante
CA	Corrente Alternada	DRCIE	Direção Regional do Comércio, Indústria e Energia
CFM	Centro Freira da Madeira	ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasting
		EDP	Empresa - Energias de Portugal
		EEM	Empresa de Eletricidade da Madeira S.A
		EMA	Estação Meteorológica Automática

ENEREEM	Empresa de Energias Renováveis da Empresa de Eletricidade da Madeira, Lda.	INEGI	Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial
ERSATZ	Base de dados de radiação solar sintética ou modelada	IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos	IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
ESRA	Atlas Europeu de Radiação Solar	IR	Radiação Infravermelho (A - próxima, B - média, C - distante)
ETA	Estação de Tratamento de Águas	ISCCP	International Satellite Cloud Climatology Project
EVA	Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer	ISG	Irradiação Solar Global
FAA	Federal Aviation Administration	ISGD	Irradiação Solar Global Diária
FE	Fator de Emissão (gGás/kWh)	ISGH	Irradiação Solar Global Horizontal
FER	Fontes de Energia Renováveis	ISSO	International Standards Organization
FL	Lógica Fuzzy	LC	Correção à longitude
FMI	Fundo Monetário Internacional	LCD	Display de cristal líquido
FSL	Forecast Systems Laboratory	LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
GA	Genetic Algorithm	LREC	Laboratório Regional de Engenharia Civil
GDM	Modelo Gautier, Diak e Masse	LSTM	Local Standard Time Mean
GEE	Gases de Efeito de Estufa	MA	Moving Average
GFS	Global Forecast System	MBE	Mean Bias Error
GHI	Global Horizontal Irradiance	MDV	Modelo Marullo, Dalu e Viola
GLOBE	Global Learning and Observations to Benefit the Environment	MESoR	Management and Exploitation of Solar Radiation Resource
GMT	Greenwich Mean Time	METSTAT	Meteorological and Statistical Solar Radiation Model
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite	MLP	Multi-Layer Perceptron
GSM	Global System for Mobile Telecommunications	MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (EOS)
GWP	Potencial de Aquecimento Global	MOS	Model Output Statistics
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model	MSC	Meteorological Service of Canada
HL	Hora local	MSG	Meteosat Second Generation
IEA	International Energy Agency	MTSAT	Multifunctional Transport Satellite
IES	Institute for Environment and Sustainability	NAM	North American Mesoscale
IET	Institute for Energy and Transport of the JRC		
IFS	Integration Forecast System		

NASA	National Aeronautics and Space Administration	SASRAB	Satellite Algorithm for Shortwave Radiation Budget
NCAR	National Center for Atmospheric Research	SC	Sem Classificação
NCEP	National Centers for Environmental Prediction	SEPM	Sistema Electroprodutor da Madeira
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	SI	Sistema Internacional
NREL	National Renewable Energy Laboratory	SoDa	Base de dados de Radiação Solar
NSRDB	National Solar Radiation Database - NREL	SOLEMI	Solar Energy Mining
NWP	Numerical Weather Prediction	STC	Condições de Teste Standard
NWS	National Weather Service	SUNY	State University of New York
ONU	Organização das Nações Unidas	SWERA	Solar and Wind Energy Resource Assessment
OPzS	Bateria estacionária de ácido-chumbo	TMM	Typical Meteorological Month
PAES	Plano de Ação para a Energia Sustentável	TMY	Typical Meteorological Year
PAUER	Projeto de Avaliação e Utilização de Energias Renováveis	TOA	Top of the Atmosphere
PGRAM	Presidência do Governo Regional da Madeira	TSA	Tempo Solar Aparente
PSU	Penn State University	TSI	Total Sky Imager
PV	Photovoltaic (Fotovoltaico)	UE	União Europeia
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System	UTM	Universal Transverse Mercator
PVSAT	Performance Check for Grid	UV	Radiação Ultravioleta
RAM	Região Autónoma da Madeira	VLSI	Very Large Scale Integration
RBF	Radial Basis Function	WMO	World Meteorological Organization
RMSD	Root Mean Square Deviation	WNN	Wavelet Neural Network
RMSE	Root Mean Square Error	WRC	World Radiation Center
RNA	Rede Neural Artificial	WRF	Weather Research and Forecast
RS	Radiação Solar	WRR	World Reference Radiometric
RSECE	Regulamento dos Sistemas	WSG	World Standard Group
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos	ZFIM	Zona Franca Industrial da Madeira
RTM	Modelo de transferência Radiativa		

CARATERES

CH₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO₂	Dióxido Carbono
CO_{2e}	Dióxido Carbono equivalente
E_{oT}	Equação do Tempo
G_{sc}	Constante Solar, 1367 W/m ²
Gt	Unidade de medida: gigatonelada que corresponde a 1×10 ⁹ toneladas
H₂O	Vapor de água
I	Corrente elétrica
I₀	Irradiância total extraterrestre (W/m ²)
I_{clear}	Irradiância obtida pelo modelo de céu limpo (W/m ²)
I_h	Irradiância no plano horizontal (W/m ²)
I_{MP}	Corrente a máxima potência
I_{sup}	Irradiância medida na superfície terrestre (W/m ²)
I_{sc}	Corrente de curto-circuito
K_t	Índice de claridade
K*	Índice de céu limpo
N₂	Azoto
N₂O	Óxido nitroso
nm	Unidade de medida: nanómetro que corresponde a 1×10 ⁻⁹ metros
O₂	Oxigénio
O₃	Ozono
P_{MP}	Potência de Pico
V	Tensão elétrica
V_{MP}	Tensão à máxima potência
V_{oc}	Tensão em circuito aberto
α	Ângulo de altitude solar
β	Ângulo de inclinação do painel
δ	Declinação solar
θ	Ângulo de incidência da radiação solar
λ	Comprimentos de onda
ρ	Refletividade medida na imagem prevista
ρ_{Ground}	Refletividade medida no solo
ρ_{Cloud}	Refletividade medida na nuvem
φ	Ângulo de zénite solar

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A ilha da Madeira possui, nas suas raízes culturais, referências à utilização de recursos endógenos para aproveitamento energético. Desde a sua descoberta em 1419, até os dias de hoje, o vento, a água, a biomassa e o sol estão na origem da produção da energia elétrica na ilha da Madeira, e recorrem às melhores tecnologias existentes na época.

Em 1953, foi construída a primeira central hidroelétrica na ilha da Madeira e, um ano depois, em 1954, foi construído o primeiro projeto de instalação de biogás, na ilha, que visava a produção de calor e eletricidade. Mais tarde, entre 1979 e 1981, foi estudado o aproveitamento da energia das ondas (Projeto Pêndulo).

Em 1983, foi instalado, nas ilhas Selvagens, o primeiro sistema fotovoltaico de Portugal, para produção de energia elétrica. O primeiro parque eólico, para produção de eletricidade em Portugal, foi instalado no arquipélago da Madeira, em 1984, e, o seu crescimento foi condicionado principalmente devido à capacidade de adaptação da rede elétrica regional (Esteves, 2007).

As centrais hídricas têm contribuído para uma redução da dependência em relação aos derivados de petróleo e, através da sua relação com a energia eólica, permite a bombagem hídrica nas horas de vazio para posterior produção de energia, potencia o crescimento de ambas.

No ano de 2008, foi apresentado o *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*, uma aposta na divulgação de informação técnica desta fonte de energia renovável, até à data pouco disseminada, sendo que só a partir do ano de 2009 surgiu o contributo desta tecnologia na rede elétrica.

No ano de 2012, foi dado um novo impulso à valorização dos recursos endógenos e promoção da eficiência energética através do *Plano de Ação para a Energia Sustentável da ilha da Madeira* desenvolvido no âmbito do Pacto das Ilhas. Neste plano foram definidos objetivos e metas a atingir em 2020 e as linhas estratégicas de apoio às ações de implementação. Estas linhas estratégicas têm em comum dois aspetos fundamentais que assentam na melhoria da eficiência na conversão e na utilização da energia, bem como o aumento da penetração das energias renováveis na procura de energia primária (AREAM, DRCIE, & EEM S.A., 2012).

No ano de 2014, procedeu-se à adaptação da nave III da Central Térmica da Vitória, para o consumo de gás natural.

No ano de 2015, foram iniciados os trabalhos de campo nos dois locais pré identificados como promissores para a eventual instalação de uma central piloto de geotermia induzida no âmbito da realização do Projeto de Avaliação do Potencial da Energia Geotérmica Estimulada da ilha da Madeira elaborado pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) e solicitado pela Empresa de Eletricidade da Madeira (EEM) (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2014b).

Em 2016 será iniciada a ampliação do aproveitamento hidroelétrico da Calheta com prazo de finalização 2017. Esta nova Central Hidroelétrica da Calheta III apresentará uma potência instalada de 30 MW e bombagem reversível para armazenamento de excesso de produção renovável. Este investimento prevê-se fundamental para a renovação dos parques eólicos antigos e mesmo luz verde para a construção de novos parques, já projetados. Podemos assim concluir que desde cedo as energias renováveis têm sido estudadas, desenvolvidas, implementadas e melhoradas no arquipélago da Madeira.

1.2 OBJETIVOS

O Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) desempenha, a nível regional, um papel importantíssimo no domínio das energias renováveis, através do envolvimento em estudos e projetos, bem como na divulgação de informação técnica e prestação de formação especializada.

Este relatório foi realizado no âmbito do estágio curricular realizado no Departamento de Hidráulica e Energia Renováveis do LREC da ilha da Madeira. Neste estágio foi proposto um plano de trabalhos a realizar, durante o período de valência do mesmo, período compreendido entre janeiro de 2015 a dezembro de 2015. Neste trabalho, foi definido uma proposta de plano de estágio que ao longo do mesmo foi sendo adaptado e reajustado tendo em conta as necessidades e disponibilidades existentes. Foram assim definidos três objetivos principais: descrever a evolução do Sistema Electroprodutor da ilha da Madeira (SEPM), na última década, tendo em conta as metas definidas no *Plano de Ação para as Energias Sustentáveis (PAES) 2020*, posteriormente estudar a distribuição da radiação solar global a partir dos registos efetuados por estações meteorológicas automáticas (EMAs) existentes na região e por último, realizar uma breve descrição acerca do estado de funcionamento e das operações de manutenção de alguns sistemas fotovoltaicos isolados e de fins múltiplos instalados na Madeira, geridos pelo LREC, ao longo do acompanhamento de algumas visitas de manutenção a realizar.

A descrição da evolução do SEPM, na última década, tendo em conta as metas definidas no PAES 2020, pretende caracterizar a evolução da produção de energia elétrica e da potência instalada pelas fontes de energia renováveis (FER) e não renováveis, assim como a evolução das emissões de dióxido de carbono e do fator de emissões específicas.

Com o tratamento e análise aos registos diários da Irradiação Solar Global (ISG) de EMAs existentes no arquipélago, no período compreendido entre o primeiro mês completo de envio de dados e o mês de agosto de 2015, pretende-se estudar a distribuição da radiação solar global no arquipélago. Serão utilizados os registos de dez estações meteorológicas da rede LREC, nove na ilha da Madeira (LREC, Trapiche, Parque Ecológico do Funchal, Bica da Cana, Encumeada, Machico, Pico das Pedras, Porto Moniz, Prazeres e Pico Verde) e uma nas ilhas Desertas (Deserta Grande). Será igualmente verificada a disponibilidade de integrar neste estudo os dados diários da ISG provenientes da rede de EMAs da delegação regional do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), composta por dezassete estações, dezasseis na ilha da Madeira (Observatório, Lido, Chão do Areeiro, Pico Alto, Aeroporto, Ponta de São Lourenço, Santo da Serra, Quinta Grande, Lugar de Baixo, Bica da Cana, Ponta do Pargo, Porto Moniz, Achadas da Cruz, São Vicente, São Jorge

e Santana) e uma na ilha do Porto Santo (Aeroporto). Esta compilação de dados, de um total de 27 estações meteorológicas de superfície, permitirá analisar a variação da Irradiação Solar Global Diária (ISGD), por concelho, de estações de redes diferentes e, assim validar o correto funcionamento de cada uma. Posteriormente deverá ser realizado um estudo comparativo entre a ISGD das EMAs com a correspondente ISGD na base de dados da ferramenta PVGIS e do *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira* de forma a validar de forma parcial a distribuição geográfica da radiação solar global na Madeira e verificar a disparidade existente entre modelos de previsão de radiação solar global.

No âmbito das visitas de acompanhamento à manutenção dos sistemas fotovoltaicos isolados e de fins múltiplos geridos pelo LREC, deverá ser realizada uma breve descrição acerca do estado de funcionamento dos sistemas visitados e das operações de manutenção. Verificada a disponibilidade de utilização de uma câmara termográfica no decurso do estágio foi incluído nos objetivos uma abordagem à utilização da termografia como método rápido e eficaz na caracterização do funcionamento de sistemas energéticos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este relatório encontra-se dividido em cinco capítulos. No primeiro capítulo é descrito o enquadramento deste relatório, os objetivos e a estrutura seguida.

No capítulo 2 é abordada a caracterização do SEPM, na qual é apresentado uma descrição das FER e das fontes de energia não renováveis, na ilha da Madeira e uma abordagem à evolução, tanto da energia elétrica num todo como, das energias renováveis e da emissão de dióxido de carbono, na última década.

O capítulo 3 engloba quatro partes sobre o estudo da radiação solar na ilha da Madeira. A primeira parte refere-se à revisão da literatura, que incide sobre: a caracterização da radiação solar, os instrumentos de quantificação, a descrição dos bancos de dados históricos europeus de radiação solar e enumeração dos métodos existentes de previsão da radiação solar. Na segunda parte são caracterizadas as duas redes de EMAs que quantificam o recurso energético solar do arquipélago e posteriormente são descritas as metodologias utilizadas no cálculo da variação anual da ISGD e análise, por concelho, dos resultados. Na terceira parte é realizado o estudo comparativo entre os resultados obtidos pelas estações meteorológicas de superfície e, os referidos pelos dois modelos de previsão da radiação solar, a base de dados da ferramenta PVGIS e o *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*, para os locais. Por fim, na quarta parte deste capítulo, é realizada uma discussão dos resultados obtidos.

O capítulo 4 é composto por três partes. A primeira parte encontra-se afeta à revisão da literatura dos procedimentos de manutenção, dos elementos constituintes dos sistemas fotovoltaicos isolados, da importância da termografia, no apoio à verificação e manutenção dos mesmos e a descrição das instalações visitadas. Na segunda parte, são apresentadas as constatações observadas nas estações visitadas. Na terceira e última parte são apresentadas as considerações finais.

Por fim, no capítulo 5 encontram-se descritas as conclusões deste trabalho e algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 SISTEMA ELECTROPRODUTOR DA ILHA DA MADEIRA

2.1 INTRODUÇÃO

O clima terrestre é regulado pelo constante fluxo de energia proveniente do Sol que atinge a superfície do planeta. A atmosfera enfraquece o feixe solar pela absorção, dispersão e reflexão. Cerca de 30% da radiação solar é imediatamente refletida de volta para o espaço. A restante energia, ao atravessar a atmosfera, é diferencialmente absorvida, onde uma fração da radiação ultravioleta de pequeno comprimento de onda é parcialmente filtrada na estratosfera, devido à presença de ozono, e a radiação que atinge a superfície terrestre é predominantemente do visível e é absorvida pelo solo, água e ar, podendo ser convertida em calor através do aumento de temperatura da superfície terrestre ou da evaporação/evapotranspiração, ou ainda convertida em energia mecânica, elétrica ou química. Uma parte da energia absorvida pela superfície terrestre é reenviada para o espaço, na forma da radiação infravermelha (IR) de comprimento de onda longo, que ao tentar atravessar a atmosfera, é parcialmente absorvida pelos gases que a constituem (Azoto (N_2) e Oxigénio (O_2) $\approx 99\%$; vapor de água, dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4)). O CO_2 e o vapor de água são os principais absorventes, e por isso são conhecidos como os principais gases com efeito de estufa (GEE). Sem o denominado “efeito de estufa” a temperatura média na superfície terrestre seria 33 °C inferior à atual, impossibilitando a vida como a conhecemos no nosso planeta. É então necessário estabelecer na atmosfera concentrações reduzidas destes gases, de forma a manter as condições essenciais para a vida no planeta (Borrego, Lopes, Ribeiro, Carvalho, & Miranda, 2010).

No entanto, têm-se verificado o aumento da concentração de alguns GEE, como o CO_2 , CH_4 e N_2O , na atmosfera devido às atividades antropogénicas na biosfera potenciando o efeito de estufa. Assim, para estudar a capacidade de cada gás enquanto GEE, relativamente a um composto de referência foram propostas métricas para os equalizar. O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) criou a métrica GWP (Potencial de Aquecimento Global) que exprime em termos físicos o efeito de aquecimento global provocado pela emissão instantânea de 1 kg de um gás GEE relativamente ao CO_2 . Para os GEE, os valores de conversão GWP, para um período de vida de 100 anos (GWP_{100}) tempo potencial de aquecimento global em relação ao CO_2 são apresentados nos relatórios do IPCC, sendo que o último foi apresentado em 2014 intitulado de AR5 (Quinta Avaliação) onde constam não só os valores mais recentes mas também os referentes à SAR (Segunda Avaliação) e à AR4 (Quarta Avaliação). Na tabela 2.1 são apresentados os valores de conversão do metano e do óxido nitroso nas métricas do SAR, do AR4 e do AR5 para 100 anos de horizonte (GWP_{100}).

Tabela 2.1 – Principais valores do Potencial de Aquecimento Global (GWP) relativo ao CO_2 .

Fonte: (Greenhouse Gas Protocol, 2015).

Industrial designation or common name	Chemical formula	GWP values for 100-year time horizon		
		Second Assessment Report (SAR)	Fourth Assessment Report (AR4)	Fifth Assessment Report (AR5)
Carbon dioxide	CO_2	1	1	1
Methane	CH_4	21	25	28
Nitrous oxide	N_2O	310	298	265

Com base no GWP_{100} é possível então determinar a quantidade de GEE em termos de CO_2 equivalente (CO_2e) multiplicando a quantidade de cada composto pelo respetivo GWP_{100} . Esta medida, CO_2e , uniformiza e facilita a análise do impacto de uma quantidade de um determinado composto no aquecimento global (Greenhouse Gas Protocol, 2015).

Apesar do aumento das políticas de mitigação das alterações climáticas, as emissões anuais de GEE cresceram em média 1 $GtCO_2e$ por ano a partir do ano de 2000 comparativamente com o crescimento de 0,4 $GtCO_2e$ por ano entre 1970 e 2000, visível na figura 2.1.

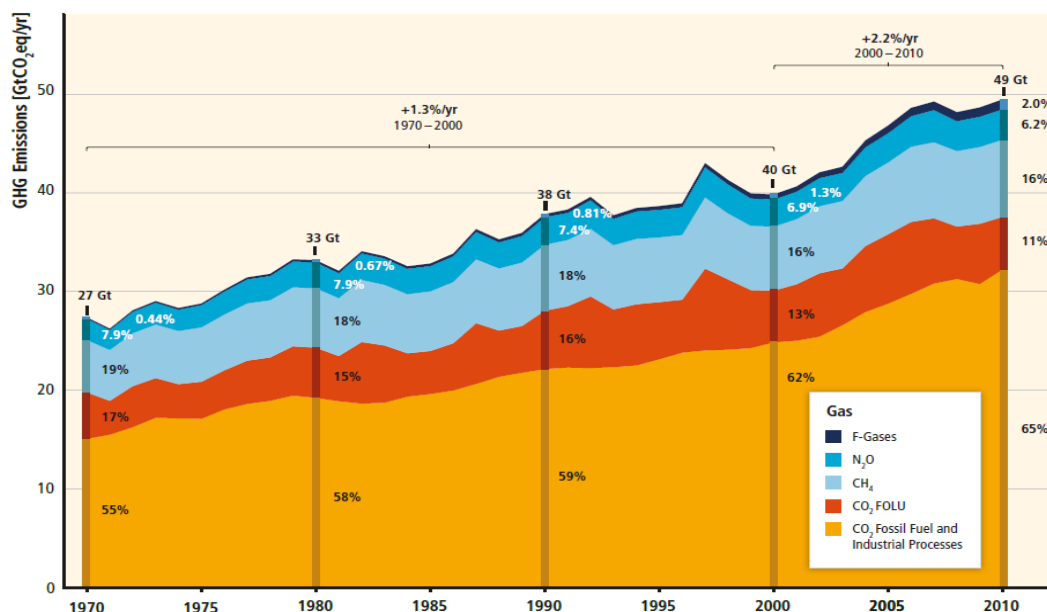


Figura 2.1 – Total das emissões anuais antropogénicas por grupos de GEE entre 1970 e 2010.

Fonte: (Mulugetta, Hertwich, Riahi, Gibon, & Neuhoﬀ, 2014).

Dos 49 ($\pm 4,5$) $GtCO_2e$ /ano de emissões totais antropogénicas de GEE em 2010, o CO_2 continua a ser o principal GEE respondendo por 76%, o CH_4 por 16%, o N_2O por 6,2% e os gases fluorados por 2%. No período entre 2000 e 2010 os valores atingidos foram os mais altos na história humanidade, com as emissões anuais antropogénicas de GEE a aumentarem 10 $GtCO_2e$ entre 2000 e 2010, proveniente diretamente do fornecimento de energia (47%), indústria (30%), transportes (11%) e edifícios (3%). Desde 2000, que as emissões de GEE têm vindo a crescer em todos os setores, com exceção do AFOLU.

Na figura 2.2 é possível verificar que em 2010, 35% (17 $GtCO_2e$) das emissões de GEE foram libertados no setor de fornecimento de energia, 24% (12 $GtCO_2e$, emissões líquidas) em AFOLU, 21% (10 $GtCO_2e$) na indústria, 14% (7,0 $GtCO_2e$) nos transportes e de 6,4% (3,2 $GtCO_2e$) em edifícios. A contabilização das emissões indiretas aumenta as contribuições dos setores dos edifícios e da indústria para 19% e 31%, respetivamente (Mulugetta et al., 2014).

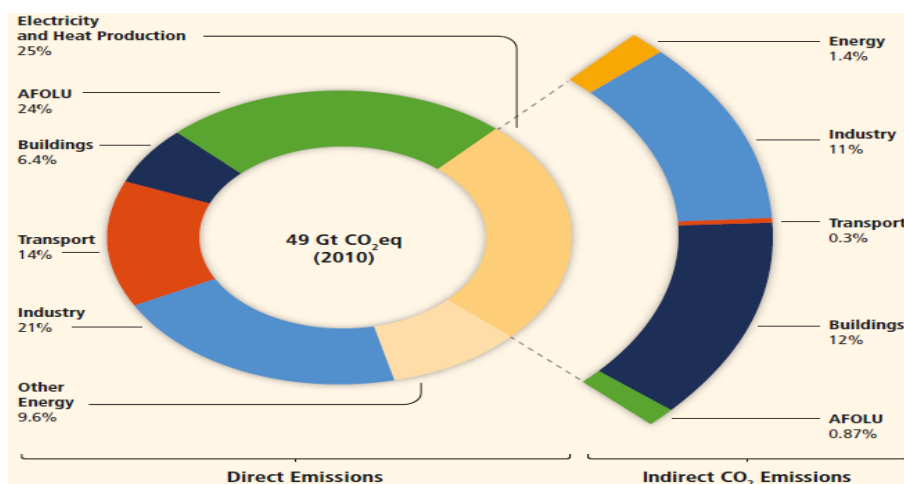


Figura 2.2 – Emissões de gases de efeito de estufa por setores económicos.

Fonte: (Mulugetta et al., 2014).

Globalmente, o crescimento económico e o aumento da população continuam a ser os motores mais importantes das emissões de CO₂ e provenientes da queima de combustíveis fósseis. A contribuição do crescimento da população entre 2000 e 2010 manteve-se praticamente idêntica às três décadas anteriores, enquanto a contribuição do crescimento económico aumentou fortemente. O crescimento da utilização do carvão, em relação a outras fontes de energia, reverteu a tendência de longa data de descarbonização gradual da oferta de energia do mundo. Esta problemática tem merecido especial preocupação por parte da Organização das Nações Unidas (ONU), que tem organizado conferências de forma a fomentar um acordo global para controlar as emissões de GEE e para lidar com os impactos das alterações climáticas.

Em dezembro de 2015, a Conferência COP21 em Paris que culminou num acordo por parte dos 195 países signatários em atuarem para que a temperatura média do planeta sofra um aumento da temperatura média do planeta “muito abaixo de 2°C” até 2100 em comparação com a média do planeta antes da Revolução Industrial, fazendo “esforços para limitar esse aumento da temperatura a 1,5°C”.

Em Portugal, e de acordo com a última atualização do inventário nacional de emissões apresentado em 2015, relativo ao ano de 2013, as emissões de GEE, sem contabilização das emissões de alteração do uso do solo e florestas, são estimadas em cerca de 65,3 MtCO₂e, representando um aumento de 7,6% face a 1990 e um decréscimo de cerca de 3% face a 2012, visível na figura 2.3.

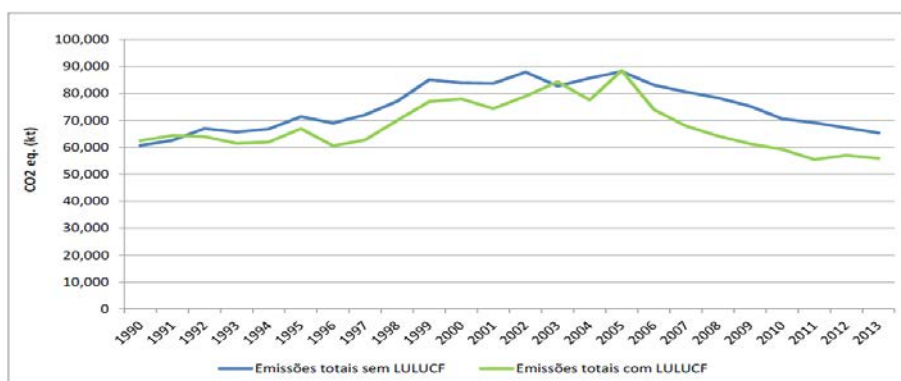


Figura 2.3 – Evolução das emissões nacionais de GEE.

Fonte: (Agência Portuguesa do Ambiente, 2015).

Em 2013, o setor da energia, incluindo os transportes, manteve-se como o principal setor responsável pelas emissões de GEE, representando 68% das emissões e representando um crescimento face a 1990 de aproximadamente 8%. Neste setor, os transportes e a produção de energia são as fontes mais importantes representando, respetivamente, cerca de 24% e 23% do total de emissões, aspetos apresentados na figura 2.4 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2015).

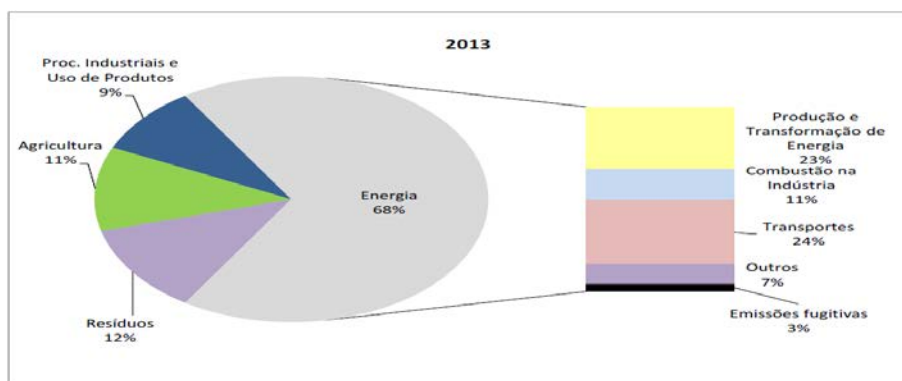


Figura 2.4 – Emissões setoriais em CO₂e (2013).

Fonte: (Agência Portuguesa do Ambiente, 2015).

Portugal apresentou um crescimento rápido durante a década de 90, no entanto a partir de 2000 as emissões nacionais registaram um abrandamento, acentuando-se a partir de 2005. Estas tendências refletem em grande medida a evolução da economia portuguesa que se caracterizou por um forte crescimento associado ao aumento da procura de energia e da mobilidade na década de 90, e a situação de estagnação e recessão verificada na economia portuguesa nos últimos anos.

Desde 2011 que Portugal apresenta um decréscimo no consumo final de energia, aspeto que poderá ser justificado pelas medidas de austeridade e pela implementação geral do Programa de Assistência Financeira ao abrigo do FMI e da UE, bem como pela crise económica e financeira verificada a nível europeu.

Em 2013 houve um decréscimo de 2,7%, no consumo final de energia, apresentando no entanto, um crescimento de 1% no consumo de energia primária justificado pelo aumento da produção das refinarias e petroquímica. Não foi no entanto, devido à conjuntura apresentada, que as emissões diminuíram, mas já apresentavam uma diminuição fruto das políticas de controlo de poluição, introdução de combustíveis menos poluentes (gás natural em 1997), instalação de unidades de ciclo combinado, implementação progressiva de unidades de cogeração e, uma melhoria da eficiência energética e tecnológicas nos processos industriais. Atualmente estas políticas têm sido orientadas para o desenvolvimento das FER, em especial da eólica.

Em suma, Portugal tem vindo a aplicar um processo de descarbonização da economia, com menos carbono emitido por cada unidade de riqueza produzida, potenciado pela contribuição das fontes renováveis endógenas na produção energética nacional (Agência Portuguesa do Ambiente, 2015).

Na Região Autónoma da Madeira (RAM), o primeiro plano energético regional foi provado em 1989, sendo posteriormente revisto e atualizado nos anos de 1992 e 2002. Em 2012, foi aprovado o Plano de Política Energética da Região Autónoma da Madeira, constituindo o mais recente instrumento de orientação da

estratégia adotada de valorização dos recursos endógenos e de promoção da eficiência energética. Assim, os principais objetivos estabelecidos, as metas e os resultados esperados no ano 2020 com a implementação das ações do plano são apresentados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Objetivos, metas e resultados esperados em 2020 com a implementação do PAES.
Fonte: (AREAM et al., 2012).

Objectivos		Metas	Resultados esperados
1.	Melhorar a segurança do aprovisionamento de energia.	Aumentar em 20% o número de dias de autonomia de armazenamento de energia primária em relação a 2005.	>20%
2.	Reduzir a dependência do exterior.	Aumentar para 20% a participação dos recursos energéticos renováveis na procura de energia primária.	20%
		Aumentar para 50% a participação dos recursos energéticos renováveis na produção de electricidade.	50%
3.	Reduzir a intensidade energética no Produto Interno Bruto.	Reduzir em 20% a intensidade energética no Produto Interno Bruto (energia primária/Produto Interno Bruto) em relação a 2005.	>20%
4.	Reduzir as emissões de dióxido de carbono.	Reduzir em 20% as emissões de CO ₂ em relação a 2005.	23%

Sendo o setor da energia responsável pela maior fatia de emissões antropogénicas de GEE na Madeira, o seu estudo permite-nos ficar elucidados sobre a evolução e adaptação deste setor relativamente à necessidade de mitigação das alterações climáticas e cumprimento das metas do PAES 2020.

O SEPM é constituído por duas centrais térmicas, uma da EEM com potência instalada de 167,04 MW e a outra da entidade privada da Atlantic Islands Electricity, S.A. (AIE) de 36 MW, perfazendo um total de 203,4 MW instalados. Fazem parte igualmente do SEPM dez centrais hidroelétricas, com uma potência instalada de 50,69 MW, nove parques eólicos perfazendo 45,11 MW instalados, um SVERSU com 8 MW e por fim, 19,08 MW provenientes de parques fotovoltaicos (inclui a produção em regime especial (DL 312/2001), a microprodução (DL 363/2007) e miniprodução (DL 34/2011)) (Empresa de Electricidade da Madeira, 2014b).

2.2 PRINCIPAIS INFRAESTRUTURAS DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS DO SEPM

A figura 2.5 apresenta a distribuição das principais infraestruturas do SEPM. As centrais hidroelétricas existentes na ilha da Madeira incluem infraestruturas pertencentes à EEM e à Água e Resíduos da Madeira, S.A. (ARM).

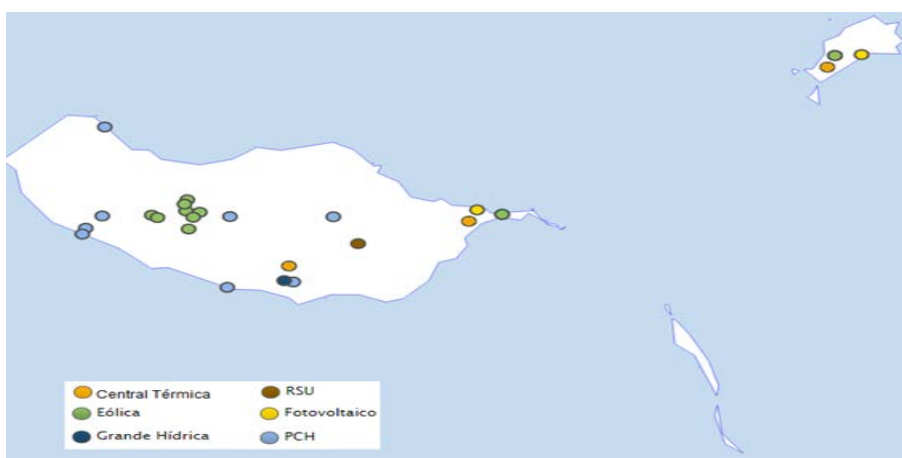


Figura 2.5 - Localização das centrais elétricas do arquipélago da Madeira.
Fonte: (INEGI & APREN, 2015).

Na figura 2.6 é apresentada a localização das principais centrais hidroelétricas existentes na ilha da Madeira.



Figura 2.6 - Localização esquemática das centrais hidroelétricas na ilha da Madeira.

Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2014a).

2.2.1 CENTRAL HIDROELÉTRICA DA CALHETA I (CALHETA DE VERÃO)

A Central Hidroelétrica da Calheta I (Calheta de Verão), figura 2.7, foi a primeira a ser construída em 1953 e mais tarde ampliada, sendo que atualmente está equipada com quatro turbinas Pelton que são alimentadas por três quedas de água provenientes do Paúl da Serra, do Rabaçal e da Rocha Vermelha. A central conta atualmente com 4,57 MW de potência instalada e a queda útil está distribuída entre, os 622 m, 308 m e 173 m (Empresa de Eletricidade da Madeira, 1978a).



Figura 2.7 – Central Hidroelétrica da Calheta I.

Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 1978a).

2.2.2 CENTRAL HIDROELÉTRICA DA CALHETA II (CALHETA DE INVERNO)

A Central Hidroelétrica da Calheta II, figura 2.8, foi construída em 1992 e é uma central de fio de água equipada com uma turbina Pelton que é alimentada pelos caudais excedentários ao abastecimento público, garantidos pelos caudais já turbinados na Central Hidroelétrica da Calheta I. Apresenta 7,3 MW de potência instalada e a queda útil é de cerca de 610 m. Por fim, a água turbinada nesta central é restituída diretamente no mar, uma vez que a cota, a jusante, já não permite outra utilização (Empresa de Eletricidade da Madeira, 1992).



Figura 2.8 - Central Hidroelétrica da Calheta II.

Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 1992).

2.2.3 CENTRAL MINI-HÍDRICA DO LOMBO BRASIL

A Central Mini-Hídrica do Lombo Brasil, figura 2.9, é uma central que utiliza os caudais captados na galeria do Rabaçal, para abastecimento público, sendo a mais pequena central da rede da EEM. Está equipada com uma turbina 0,15 MW de potência instalada. Situa-se no lugar de Lombo Brasil, freguesia e concelho da Calheta, perto da Central da Calheta I.



Figura 2.9 – Central Mini-Hídrica do Lombo Brasil.
Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2014a).

2.2.4 CENTRAL HIDROELÉTRICA DOS SOCORRIDOS

A central hidroelétrica do aproveitamento de fins múltiplos dos Socorridos, figura 2.10, utiliza as águas drenadas até ao covão, por um sistema de túneis, canais e captações, está equipada com três turbinas Pelton de 8 MW cada perfazendo uma potência instalada de 24 MW e iniciou a sua produção em 1994. Esta central possui uma estação de bombagem, equipada com quatro bombas de cerca de 3,75 MW cada, de potência instalada (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2003).



Figura 2.10 - Central Hidroelétrica da Ribeira dos Socorridos.
Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2003).

2.2.5 CENTRAL HIDROELÉTRICA DA RIBEIRA DA JANELA

A Central Hidroelétrica da Ribeira da Janela, figura 2.11, construída em 1965, situa-se na foz da ribeira do mesmo nome e utiliza as águas conduzidas pelo canal da Ribeira da Janela até a câmara de acumulação, à cota de 410 m. É constituída por duas turbinas Pelton perfazendo uma potência instalada de 3,2 MW. Por fim, a água turbinada nesta central é restituída diretamente no mar, uma vez que a cota, a jusante, já não permite outra utilização (Empresa de Eletricidade da Madeira, 1965).



Figura 2.11 – Central Hidroelétrica da Ribeira da Janela.

Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 1965).

2.2.6 CENTRAL HIDROELÉTRICA DA SERRA DE ÁGUA

A Central Hidroelétrica da Serra de Água, figura 2.12, foi inaugurada em 1953 tinha o papel de compensação e regulação de vários parâmetros, nomeadamente a frequência da rede elétrica da ilha. Atualmente, no inverno e nas horas de ponta tem a função de central de base hidroelétrica, e nos períodos de estio é forçada a funcionar a fio de água de forma a manter estáveis os caudais de irrigação. É equipada com duas turbinas Pelton de 2,4 MW perfazendo 4,8 MW de potência instalada (Empresa de Eletricidade da Madeira, 1953).



Figura 2.12 - Central Hidroelétrica da Serra de Água.

Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 1953).

2.2.7 CENTRAL HIDROELÉTRICA DA FAJÃ DA NOGUEIRA

A Central Hidroelétrica da Fajã da Nogueira, figura 2.13, iniciou a sua produção em 1971 e é alimentada pelas águas das levadas da Serra do Faial e do Juncal, armazenadas na câmara de carga, a 968 m. A central é equipada com duas turbinas Pelton que perfazem 2,4 MW de potência instalada e a altura de queda bruta é de 343 m. Posteriormente, a água entra num reservatório de compensação, antes de entrar na levada dos Tornos (Empresa de Eletricidade da Madeira, 1978b).



Figura 2.13 - Central Hidroelétrica da Fajã da Nogueira.

2.2.8 CENTRAL MINI-HÍDRICA DA FAJÃ DOS PADRES

A Central Mini-Hídrica da Fajã dos Padres, situada na base da falésia junto ao Cabo Girão, utiliza os caudais excedentes recolhidos no lanço sul do Canal do Norte em modo automático e não acompanhado. Está

equipada com uma única turbina com 1,7 MW de potência instalada. Por fim, a água turbinada nesta central é utilizada para irrigação de toda a fajã, restituindo a restante ao mar.

2.2.9 CENTRAL MINI-HÍDRICA DA TERÇA

A Central Mini-Hídrica da Terça é uma central que turbinava águas tratadas para consumo humano provenientes da ETA da Alegria. Situa-se na freguesia de São Roque, concelho do Funchal e iniciou a sua produção em 1999, contando com 0,7 MW de potência instalada.

2.2.10 CENTRAL MINI-HÍDRICA DE SANTA QUITÉRIA

A Central Mini-Hídrica de Santa Quitéria, figura 2.14, é uma central que turbinava água bruta proveniente da câmara de carga do Covão, antes de restituir a um pequeno reservatório, onde é posteriormente repartida para a ETA de Santa Quitéria e para o regadio. O aproveitamento conta com 1,7 MW de potência instalada e localiza-se na freguesia de São Martinho, Funchal (Águas e Resíduos da Madeira, 2015a).



Figura 2.14 – Central Mini-Hídrica de Santa Quitéria.
Fonte: (Águas e Resíduos da Madeira, 2015b).

2.2.11 PROJETO DE AMPLIAÇÃO DO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DA CALHETA

Este projeto de ampliação visa globalmente contribuir para a valorização da água, para produção de energia elétrica, encaixe da energia eólica através da bombagem, armazenamento de energia e capacidade reversível, no âmbito dos objetivos estabelecidos no PAES. Este projeto permitirá uma redução da emissão de GEE, na ordem das 51,6 ktCO₂e. Esta ampliação envolve a construção da Barragem do Pico da Urze, com capacidade aproximada de 1.000.000 m³, com um aspeto final esperado da Albufeira apresentado na figura 2.15, a construção de um reservatório de restituição da Calheta/Corruchéu, construção da Central Hidroelétrica da Calheta III, construção da conduta elevatória /forçada, desde a Barragem do Pico da Urze até a nova central, construção da estação elevatória do Paul e da Calheta, ampliação das Levadas do Paúl II e da Velha do Paúl, remodelação da Levada do Lombo do Salão, recuperação biofísica do Paúl da Serra, alteração da linha Calheta - Bica da Cana a 30 KV e remodelação da Subestação do Lombo do Doutor (ATKINS, 2014). A introdução deste projeto, no sistema de produção de energia da ilha da Madeira, permitirá a partir de 2016/2017, um aumento em 30 MW e no futuro um encaixe de cerca de 25 MW adicionais de potência eólica. A central estará equipada com dois turbo-geradores de 15 MW cada com uma queda útil de cerca de 680 m (ATKINS, 2014).



Figura 2.15 – Aspeto final da Barragem do Pico da Urze.

Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016b).

Em 2015, os parques eólicos da ilha da Madeira foram responsáveis por 9,16% (75 GWh) do mix de produção do SEPM (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016a). A potência instalada nos parques eólicos, na ilha da Madeira, é de 45,11 MW e de 1,11 MW, na ilha do Porto Santo, conforme é possível verificar através da tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Caracterização dos parques eólicos no arquipélago da Madeira.

Fonte dos dados: (INEGI & APREN, 2014).

Nome do Parque Eólico	Fabricante	Modelo	Quantidade	Potência Nominal (KW)	Potência Total (MW)	Ligação à rede
Porto Santo Cabeço do Carvalho	VESTAS	V47	1	660	1,11	2001
		V29	2	225		1996
Canical	Nordtank	NTK150	6	150	0,90	1993
Bica da Cana	VESTAS	V90-3.0 MW	1	3000	3,00	2013
Paul da Serra	VESTAS	V47	5	660	3,30	2003
Paul da Serra II	Eozen-Vensys	1,5 MW (70)	4	1500	6,00	2009
Fonte do Juncal	Perform I	NORDTANK	2	130	0,26	2009
	Perform 2/N	NORDTANK	3	150	0,45	2009
	Perform 2/S	NORDTANK	9	150	1,35	2009
	Fonte do Juncal	Eozen-Vensys	4	1500	6,00	2009
LOIRAL I	VESTAS	V52	6	850	5,10	2009
LOIRAL II	VESTAS	V90-3.0 MW	2	3000	6,00	2011
Pedras	VESTAS	V52-850 KW	12	850	10,20	2009
Quinta do Lorde	VESTAS	V52-850 KW	3	850	2,55	2009
TOTAL			53		45,11	

2.2.12 PARQUE EÓLICO DO CANICAL

O Parque Eólico do Canical situado na Ponta de São Lourenço, figura 2.16, foi construído pela empresa ENERGÓLICA S.A. (Grupo Pestana) e posteriormente, em 2011, vendido à AIE dona da Central Térmica Privada do Canical (CTC). Este parque iniciou a sua produção em 1993, contando atualmente com 6 aerogeradores, que perfazem 0,9 MW de potência instalada, tabela 2.3. Situa-se na Ponta de São Lourenço, freguesia do Canical, concelho de Machico, ilha da Madeira.



Figura 2.16 – Localização do parque eólico do Canical.

Fonte: (INEGI & APREN, 2015).

2.2.13 PARQUE EÓLICO DA BICA DA CANA (PAUL DA SERRA)

Este parque eólico foi igualmente construído pela empresa ENERGÓLICA S.A. (Grupo Pestana) e em 2011 foi igualmente vendido à empresa AIE. Iniciou a sua produção em 1993, contando com 12 aerogeradores que perfaziam 1,8 MW de potência instalada. Em 2012, foi alvo de remodelação, tendo sido instalado um único aerogerador de 3 MW (tabela 2.3), e efetuado o desmantelamento dos 12 aerogeradores existentes, de 150 KW cada. Situa-se na Bica da Cana, freguesia dos Canhas, concelho da Ponta do Sol.

2.2.14 PARQUE EÓLICO DO PAUL DA SERRA I

O Parque Eólico do Paúl da Serra I, visível na figura 2.17, pertence à sociedade ENEREEM – Energias Renováveis, Lda. (ENEREEM), com participação da EEM. Iniciou a sua produção em 2003, contando atualmente com 5 aerogeradores, perfazendo 3,3 MW de potência instalada, tabela 2.3. Situa-se no Paul da Serra, freguesia e concelho de São Vicente.



Figura 2.17 – Parque Eólico do Paul da Serra I.
Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2014a).

2.2.15 PARQUE EÓLICO DO PAUL DA SERRA II

Este parque eólico encontra-se a uma cota de 1600 m, a empresa promotora foi a PERFORM3 – Parques Eólicos, Lda. do grupo ENERVENTO. Entrou em funcionamento em 2009, e é constituído por quatro máquinas Vensys, de 1,5 MW, tabela 2.3.

2.2.16 PARQUE EÓLICO DA FONTE DO JUNCAL

Este grupo de parques eólicos situados a uma cota de 1600 m, no Paúl da Serra, concelho da Ponta do Sol, pertence à empresa Perform 3 – Parques Eólicos, Lda. do grupo ENERVENTO. Iniciou a sua produção em 1992 e, atualmente é constituído por quatro sub - parques:

- Fonte do Juncal - Perform 1, composto por 2 aerogeradores, perfazendo 0,26 MW de potência instalada, tabela 2.3.
- Fonte do Juncal - Perform 2/N, iniciou a sua produção em 1993, constituído por 3 aerogeradores, perfazendo 0,45 MW de potência instalada, tabela 2.3.
- Fonte do Juncal - Perform 2/S, iniciou a sua produção em 1993, contando atualmente com 9 aerogeradores que perfazem 1,35 MW de potência instalada, tabela 2.3.
- Fonte do Juncal – Fonte do Juncal, iniciou a sua produção em 2009 e, é constituído por quatro máquinas VENSYS 70 de 1500 MW, perfazendo 6,00 MW de potência instalada, tabela 2.3.

Este grupo de parques eólicos é o mais antigo, em exploração, em Portugal.

2.2.17 PARQUE EÓLICO DO LOIRAL

O Parque Eólico do Loiral pertence à sociedade ENEREEM, é constituído por 6 aerogeradores que perfazem 5,1 MW de potência instalada, tabela 2.3. A sua ligação à rede foi efetuada em 2009 e situa-se na zona do Paul da Serra/Loiral, freguesia do Arco da Calheta, concelho da Calheta. Este parque envolveu um investimento de 6,5 milhões de euros.

2.2.18 PARQUE EÓLICO LOIRAL II

O Parque Eólico do Loiral II, figura 2.18, pertence à sociedade ENEREEM, é constituído por 2 aerogeradores que perfazem 6 MW de potência instalada, tabela 2.3, entrou em funcionamento em 2011. Este parque eólico situa-se na zona do Paul da Serra/Loiral, freguesia do Arco da Calheta e concelho da Calheta.



Figura 2.18 – Parque eólico do Loiral II.
Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2014a).

2.2.19 PARQUE EÓLICO DAS PEDRAS

O Parque Eólico das Pedras, figura 2.19, pertence à sociedade ENEREEM, é constituído por 12 aerogeradores que perfazem 10,2 MW de potência instalada, tabela 2.3. Situa-se no Sítio das Pedras no Paul da Serra, concelho de Ponta do Sol e representou um investimento de cerca de 13 milhões de euros. A sua ligação à rede foi efetuada em 2009.



Figura 2.19 – Parque Eólico das Pedras.
Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2014a).

2.2.20 PARQUE EÓLICO QUINTA DO LORDE

Este parque eólico, figura 2.20, pertence à empresa WINDMAD – Energias Renováveis (Grupo Sousa), entrou em funcionamento em 2009 e possui 2,55 MW instalados, tabela 2.3.



Figura 2.20 – Parque Eólico da Quinta do Lorde.
Fonte: (PGRAM, 2015).

2.2.21 PROJETOS PARA FUTUROS PARQUES EÓLICOS

PARQUE EÓLICO DO ALECRIM

A licença de exploração deste futuro parque eólico pertence à empresa VAT Portugal – Investimentos em Energia, Lda.. Está projetado para o planalto do Paúl da Serra, compreendido entre as áreas do Loiral e da Fonte do Juncal, freguesia dos Canhas e concelho da Ponta do Sol. Prevê a instalação de 6 aerogeradores numa potência total instalada de 9 MW embora desconhece-se a data prevista para a sua construção (ATKINS, 2014).

PARQUE EÓLICO DA URZE

A licença de exploração deste futuro parque eólico pertence à empresa EUROVENTOS ATLANTIC – Projetos Ecológicos e Energéticos do Atlântico, Lda., do grupo N Energias. Está projetado para 9 MW de potência instalada provenientes de 6 aerogeradores, situados no planalto do Paúl da Serra, a noroeste do pico da Urze (muito próximo da futura Barragem do Pico da Urze). O projeto dispõe de uma Declaração de Impacte Ambiental (DIA) favorável condicionada, desconhecendo-se a data prevista para a sua construção (ATKINS, 2014; N Energias, 2015).

Em 2015, os parques fotovoltaicos da ilha da Madeira foram responsáveis por 3,68% do total de energia emitida para a rede. A potência instalada dos parques eólicos na ilha da Madeira é de aproximadamente 19,38 MW e a energia injetada, na rede elétrica da ilha da Madeira, foi de 30,50 GWh (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016a).

2.2.22 PARQUE FOTOVOLTAICO DO CANIÇAL

Este parque fotovoltaico, figura 2.21, pertence à empresa ENERSISTEMS - ENERGIAS, S.A. do Grupo N Energias (50 % JVC Holding, SGPS e 50 % NUTROTON, SGPS), entrou em funcionamento em 2010 e, possui 28.800 painéis fotovoltaicos, abrangendo uma área de 170.000 m² com uma potência instalada de 6,6 MW. O valor do investimento aproximou-se dos 20 milhões de euros (N Energias, 2015).



Figura 2.21 – Parque fotovoltaico do Caniçal.
Fonte: (Output - Energias e Ambiente Lda., 2015).

2.2.23 PARQUE FOTOVOLTAICO DO LOIRAL

Este parque fotovoltaico, figura 2.22, apresenta uma potência instalada de 7 MW e é gerido pela empresa PV LOIRAL – Produção de Energia, Unipessoal, Lda. (Grupo Salvador Caetano 44,87% (2014)).



Figura 2.22 – Parque Fotovoltaico do Loiral.
Fonte: (VSR Construções Metálicas, 2016).

2.2.24 PARQUE FOTOVOLTAICO DO PAUL DA SERRA

Este parque fotovoltaico, figura 2.23, apresenta uma potência instalada de 2 MW. É gerido pela empresa Paúl Solar - Energias Fotovoltaicas da Madeira, S.A. e o investimento foi de cerca de 28 milhões de euros.



Figura 2.23 – Aspeto do Parque fotovoltaico do Paul da Serra.
Fonte: (Output - Energias e Ambiente Lda., 2015).

2.2.25 SISTEMA DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

O SVERSU é composto pela instalação de incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) da Meia Serra, figura 2.24, constituindo a principal infraestrutura de valorização energética de RSU da RAM. Este sistema de valorização energética envolve um processo controlado e automatizado que, para além de tratar os resíduos termicamente, produz eletricidade. A energia elétrica produzida pelo SVERSU é assegurada pelo grupo turbogerador, com uma potência instalada de 8 MW. Uma parte da energia produzida é encaminhada para autoconsumo no complexo, enquanto a restante é direcionada para a rede de distribuição pública.

Em 2015, a energia injetada, por este centro produtor na rede, foi de 38,90 GWh (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016a).



Figura 2.24 – Aspeto da Incineradora da SVERSU da Meia Serra.
Fonte: (Águas e Resíduos da Madeira, 2015b).

FATOR DE EMISSÃO DE CO₂ DO SVERSU

Segundo a (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016c), o fator de emissão para a categoria de resíduos sólidos urbanos FE (CO₂)_{RSU}, calculado e publicado anualmente pela ERSE, foi de 656 gCO₂/kWh, em 2015 tal como em 2014. O fator de emissão de CO₂ das categorias definidas pela (ERSE, 2011) é calculado através da equação 1, que envolve a quantidade emitida de CO₂ pela fonte de energia e a sua produção elétrica.

Equação 1 – Cálculo do fator de emissão de CO₂.

Fonte: (ERSE, 2011).

$$\text{Fator de emissão de CO}_2 \text{ f.e.} = \frac{\text{Quantidade emitida de CO}_2 \text{ fonte de energia}}{\text{Produção de eletricidade}_{\text{fonte de energia}}} = \left(\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}} \right)$$

Assim, segundo dados da EEM é possível verificar este valor, sabendo que em 2015 o SVERSU produziu 38,851 GWh e emitiu 25.487 toneladas de CO₂, que corresponde a efetivamente a um FE (CO₂)_{RSU} igual a 656 gCO₂/kWh.

2.2.26 PROJETO DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA ENERGIA GEOTÉRMICA ESTIMULADA

A EEM está igualmente a investir na avaliação do potencial da energia geotérmica estimulada, na ilha da Madeira. Este projeto está a cargo do LNEG, onde no decorrer de 2015, foram realizados os processos de sondagem nos dois locais pré-identificados, nomeadamente na zona do Maciço Central. Após a realização destes trabalhos é esperado, a determinação da melhor localização para efetuar o furo de sondagem profunda, de forma a atingir uma eventual fonte de calor para aproveitamento geotérmico, processo esquematicamente representado na figura 2.25 (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2014b).



Figura 2.25 – Esquematização do funcionamento de uma central de geotermia estimulada.

Fonte: (LNEG, 2015).

2.3 PRINCIPAIS INFRAESTRUTURAS DE FONTES DE ENERGIA NÃO RENOVÁVEIS DO SEPM

2.3.1 CENTRAL TÉRMICA DA VITÓRIA (CTV)

A CTV da EEM entrou em funcionamento no ano de 1979, para responder ao grande crescimento da procura de energia elétrica, na ilha da Madeira. Situa-se na margem esquerda da Ribeira dos Socorridos, na freguesia de São Martinho, concelho do Funchal. Esta central é constituída por três naves: CTV I composta por 6 grupos eletrogéneos (atualmente desclassificada), a CTV II com 9 grupos eletrogéneos e a mais recente CTV III composta por 3 grupos eletrogéneos e uma turbina a vapor. Os grupos sete até aos quinze funcionam a fuelóleo, os grupos dezasseis a vinte funcionam a Dual-Fuel e o grupo vinte é de ciclo combinado.

Em 2014, foi realizada a reconversão dos grupos (16 a 20) da CTV III para funcionamento a gás natural, sendo que o primeiro grupo iniciou a sua operação em março, o segundo em maio e o terceiro em julho de 2014.

Em 2015, a CTV produziu aproximadamente 424,98 GWh de energia elétrica mais aproximadamente 26 GWh do que em 2014 (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016a).



Figura 2.26 – Central Térmica da Vitória (CTV).
Fonte: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016d).

FATOR DE EMISSÃO DE CO₂ DA CENTRAL TÉRMICA DA VITÓRIA (CTV)

Segundo a (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016c), os fatores de emissão para as duas categorias de fontes de energia presentes no mix de produção da CTV, calculados e publicados anualmente pela ERSE, foi de 648 gCO₂/kWh para o FE (CO₂)_{Diesel} e de 368 gCO₂/kWh para o FE (CO₂)_{Gás Natural} em 2015. Assim, partindo de alguns dados disponibilizados pela EEM e, da equação 1, é possível calcular os fatores de emissão da CTV_{Diesel} e da CTV_{Gás Natural}.

Em 2015, em termos globais, foram emitidas aproximadamente 231.000 tCO₂ na CTV, das quais aproximadamente 172.000 tCO₂ foram provenientes dos motores de ciclo Diesel (CTV_{Diesel}) e 58.795 tCO₂ do ciclo combinado a gás natural (CTV_{Gás Natural}). Relativamente à produção de energia elétrica, a CTV_{Diesel} produziu aproximadamente 265,60 GWh e a CTV_{Gás Natural} 159,77 GWh. Posto isto, o FE (CO₂)_{Diesel} é igual a 648 gCO₂/kWh e o FE (CO₂)_{Gás Natural} igual a 368 gCO₂/kWh.

2.3.2 CENTRAL TÉRMICA DO CANIÇAL (CTC)

A CTC é uma central de cogeração fóssil que iniciou a sua atividade na Zona Franca Industrial da Madeira (ZFIM), em Julho de 2000, propriedade da empresa AIE. Ocupa uma área de implantação de cerca 6300 m², com atividade principal a produção de energia elétrica de origem térmica e, como atividade secundária, o

fornecimento de vapor a alguns consumidores industriais estabelecidos na ZFIM, figura 2.27. A totalidade da energia elétrica produzida é fornecida à EEM, a qual posteriormente a transporta e distribui. A emissão total anual de energia elétrica da CTC é de aproximadamente 192 GWh/ano. Já o vapor produzido pelo aproveitamento dos gases de escape dos motores é fornecido a instalações fabris da ZFIM.

O desenvolvimento da central deu-se em várias fases, iniciou com dois grupos a fuelóleo, em 2002 deu-se a ampliação para mais um grupo a fuelóleo e, em 2009, aconteceu a segunda ampliação, com a colocação de mais três grupos a fuelóleo, duplicando a capacidade da CTC.

A CTC possui atualmente, uma potência instalada de 36 MW (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2014b). Em 2011, a AIE adquiriu a empresa ENERGÓLICA S.A. que possui dois parques eólicos, o do Caniçal e o da Bica da Cana, no Paúl da Serra.



Figura 2.27 – Central Térmica privada do Caniçal (CTC)

Fonte: (Atlantic Island Electricity (AIE), 2015).

FATOR DE EMISSÃO DE CO₂ DA CENTRAL TÉRMICA DO CANIÇAL (CTC)

Segundo a (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016c), o fator de emissão para a categoria de Cogeração Fóssil FE (CO₂)_{Cogeração fóssil}, calculado e publicado anualmente pela ERSE, foi de 327 gCO₂/kWh, em 2015, tal como, nos anos anteriores. Nesta categoria, o cálculo do fator de emissão envolve a produção elétrica e térmica, pelo que, dado a inexistência de dados relativos à produção térmica desta central, não nos é possível verificar através do cálculo o valor do FE (CO₂)_{Cogeração fóssil}. No entanto, em 2015, tal como, nos anos precedentes, a CTC produziu aproximadamente 192 GWh de energia elétrica e, uma emissão para a atmosfera de no mínimo 125.000 toneladas de CO₂.

2.4 EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA MADEIRA

A produção de energia elétrica, na ilha da Madeira, teve um crescimento que acompanhou o avanço da tecnologia e, o aumento do número de consumidores até o ano de 2009. Em 2010, dá-se uma viragem neste panorama devido à chegada da conjuntura económica, que afetou a economia global. Na figura 2.28 é possível visualizarmos o crescimento da produção de energia elétrica por origem, entre os anos de 2002 a 2015. É ainda possível observarmos as curvas de emissão de energia para a rede e de fornecimento aos clientes, entre os anos de 2006 a 2014, curvas essas que representam a energia que é consumida e dissipada antes de ser injetada na rede elétrica regional e a que é consumida e dissipada no transporte da mesma, respetivamente. É igualmente visível que, em 2014, iniciou-se a produção de energia elétrica na CTV a partir do gás natural.

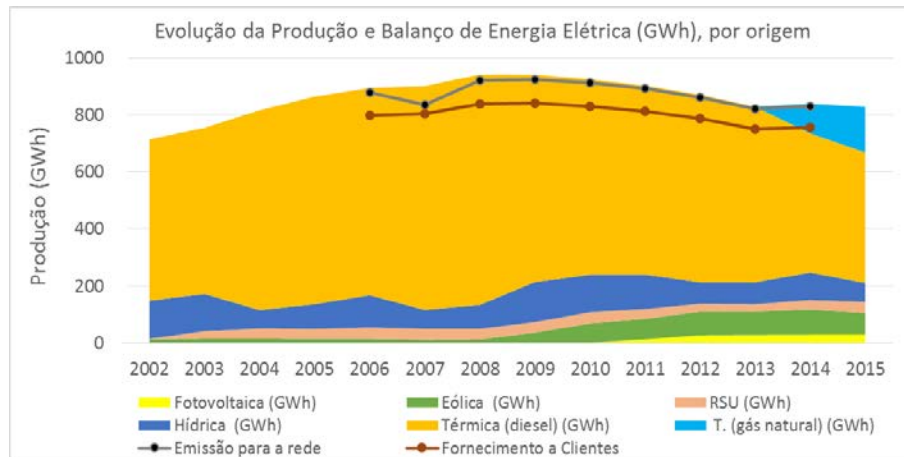


Figura 2.28 – Evolução da produção e balanço de energia elétrica na ilha da Madeira por fonte de energia.
Fonte dos dados: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016d).

Relativamente à evolução da potência instalada na ilha da Madeira por origem, figura 2.29, podemos constatar que, em 2010, houve um reforço da potência instalada na CTV (EEM). Mais tarde, devido à necessidade de cumprir o acordo de redução das emissões de CO₂, começaram a ser desativados os motores (1 a 6) da CTV I para que, em 2014, entrasse em funcionamento a CTV III reconvertida para funcionamento a gás natural. A potência instalada no SVERSU manteve-se constante neste período (8 MW). No que diz respeito à potência instalada das centrais hidroelétricas e mini-hídricas esta manteve-se ligeiramente constantes até 2010 (51.1 MW) sendo que posteriormente foi desativada uma pequena hídrica passando a 50,7 MW. A energia fotovoltaica foi introduzida em 2009 (440 KW) até que em 2015 atingiu aproximadamente 19,4 MW.

A introdução de energia eólica, na ilha da Madeira, remonta ao ano de 1992, sendo que, no período em análise neste gráfico – 2008, possuía uma potência instalada de 8,6 MW até atingir, em 2013, os 45,1 MW, mantendo-se constante até agora.

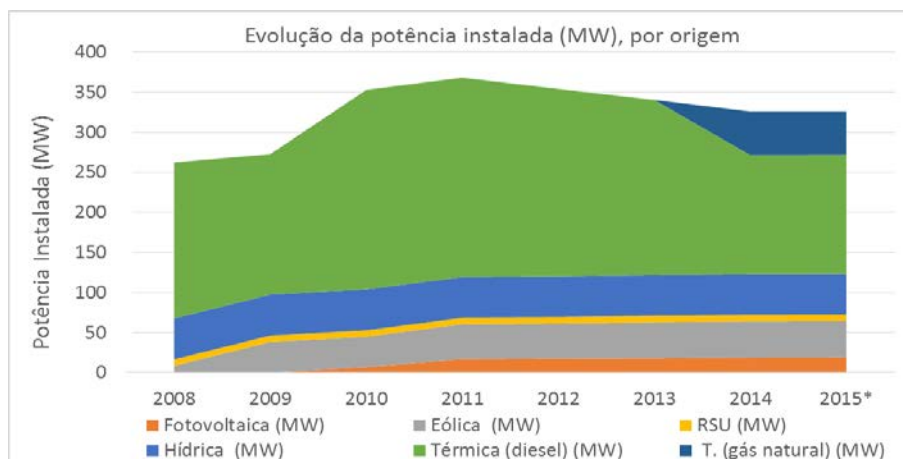


Figura 2.29 - Evolução da potência instalada (MW) por fonte de energia primária na ilha da Madeira.
Fonte dos dados: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016d).

2.4.1 PANORAMA DA ENERGIA RENOVÁVEL NO SEPM

A figura 2.30 demonstra a evolução das FER, na ilha da Madeira, entre 2002 e 2015, onde são apresentadas as fontes de energia renovável, Hídrica, Eólica, Fotovoltaica e SVERSU. Podemos constatar que em 2002 a

diversidade de fontes cingia-se a apenas duas, a hídrica e a eólica, muito embora nesse ano entrasse em funcionamento o SVERSU, onde na totalidade representaram a produção de 148,9 GWh de energia elétrica. Treze anos mais tarde, a produção atual é de 210,8 GWh a partir de quatro fontes de energia renovável, com o contributo da fotovoltaica, embora se tenha verificado uma redução de 50%, na produção de energia hídrica, em detrimento do crescimento das outras e dos contratos de compra de energia, a privados.

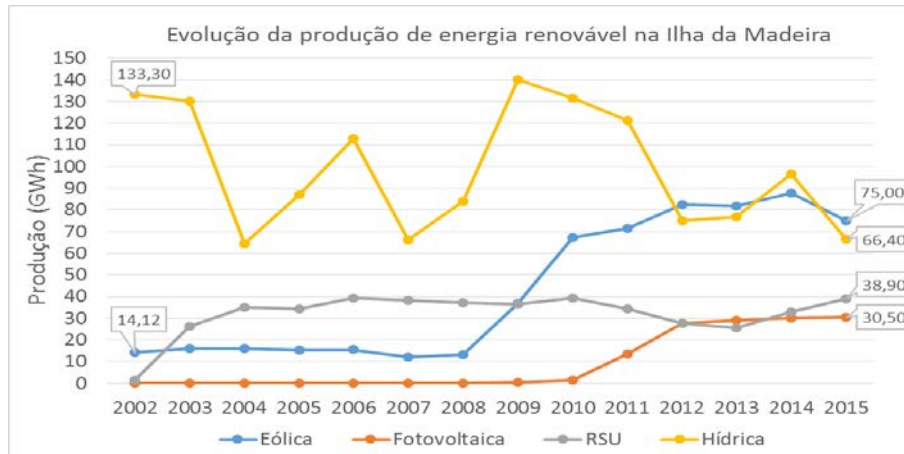


Figura 2.30 - Evolução das fontes de energia renováveis na ilha da Madeira, 2005-2015.
Fonte dos dados: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016d).

2.4.2 EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE NA MADEIRA ENTRE 2005 E 2015

A evolução da eletricidade, na ilha da Madeira, na década de 2005 a 2015, está representada na figura 2.31. A penetração das energias renováveis, no ano de 2005, atingia a 15,7% da energia produzida na ilha da Madeira, e, no ano de 2015 atingiu os 25,7%, apresentando um crescimento de 63,3%. Este crescimento deveu-se à implementação e crescimento da energia fotovoltaica e eólica. Em termos de produção de energia, por parte das centrais termoelétricas, verifica-se uma redução de 13,4%.

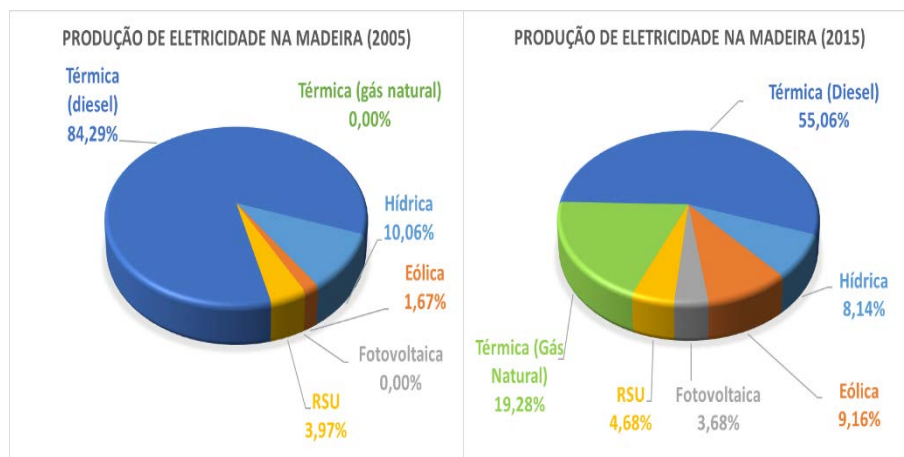


Figura 2.31 - A evolução da eletricidade na ilha da Madeira numa década (2005 -2015).
Fonte dos dados: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016d).

2.5 EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO

Relativamente às FER, o contributo para as emissões de dióxido de carbono da energia hídrica, energia eólica, energia solar, bem como da recuperação de calor residual, foi considerado nulo. Para a biomassa, admitindo uma exploração sustentável dos recursos, considerou-se um balanço neutro de emissões, enquanto, para os

RSU, o fator de emissão não é nulo, porque estes contêm componentes não renováveis cuja contribuição não é neutra.

Na figura 2.32 é apresentado a evolução das emissões de CO₂, no SEPM da ilha da Madeira, por fonte de emissão entre 2005 e 2015. Em 2005, o SEPM da ilha da Madeira emitiu para a atmosfera 526.241 tCO₂e proveniente das duas centrais térmicas, 373.733 tCO₂e na CTV Diesel e 127.298 tCO₂e na CTC Cogeração fóssil e, 25.210 tCO₂ proveniente do SVERSU. Dez anos depois, podemos verificar uma redução de aproximadamente 28%, nas emissões de CO₂ do SEPM da ilha da Madeira, onde foram emitidas 380.817 tCO₂, com aproximadamente 355.330 ton provenientes das centrais térmicas e 25.487 ton provenientes do SVERSU.

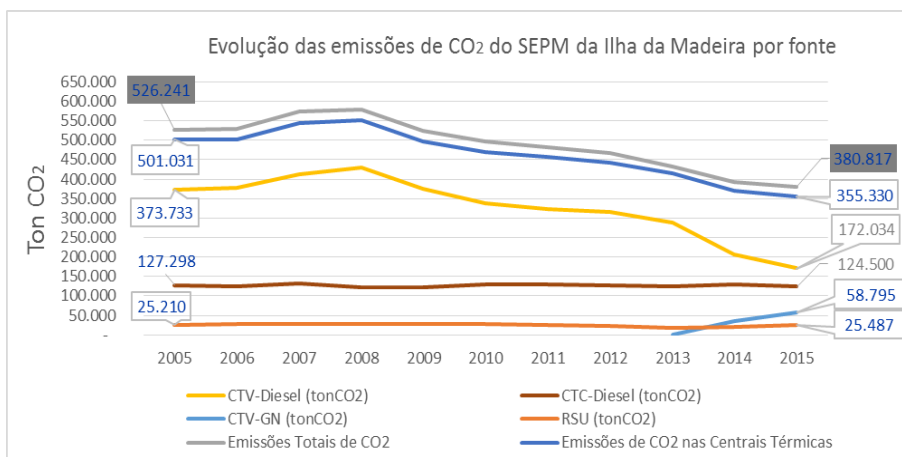


Figura 2.32 - Evolução das emissões de CO₂ no SEPM da ilha da Madeira entre 2005 e 2015 por fonte.
Fonte dos dados: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016d; ERSE, 2016).

A redução das emissões da CTV Diesel foram potenciadas após a reconversão da CTVIII para gás natural, permitindo uma redução do FE (CO₂) Diesel, que em 2013 foi de 698 gCO₂/kWh, para 648 gCO₂/kWh em 2015. Em 2015, foram produzidos 159,8 GWh de energia elétrica a partir da CTV Gás Natural, o que evitou a emissão de, pelo menos 45.000 tCO₂, para a atmosfera.

2.5.1 EMISSÕES ESPECÍFICAS ANUAIS DE DIÓXIDO DE CARBONO

Na RAM só existe um único comercializador de energia, a EEM, e em 2011 a ERSE informou todos os comercializadores do mercado português da necessidade destes cumprirem a recomendação de rotulagem da energia elétrica. Para isso, é necessário o comercializador calcular o valor das suas emissões específicas anuais, através do somatório dos fatores de emissão de cada fonte de energia em vigor, ponderados pela sua contribuição para o mix do comercializador. Desde 2009, que se tem verificado uma diminuição no valor do agregado das emissões específicas na RAM potenciado pela penetração das energias renováveis no mix de produção. No entanto, em 2014 deu-se a maior redução de emissões específicas de CO₂ devido à introdução do gás natural na CTV.

Na figura 2.33, é possível verificar a evolução das emissões específicas anuais de CO₂ da RAM desde 2009 até 2015, ano no qual as emissões específicas do agregado atingiram 556 gCO₂/kWh, as da ilha da Madeira 460 gCO₂/kWh e as da ilha do Porto Santo 556 gCO₂/kWh (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016c; ERSE, 2016).

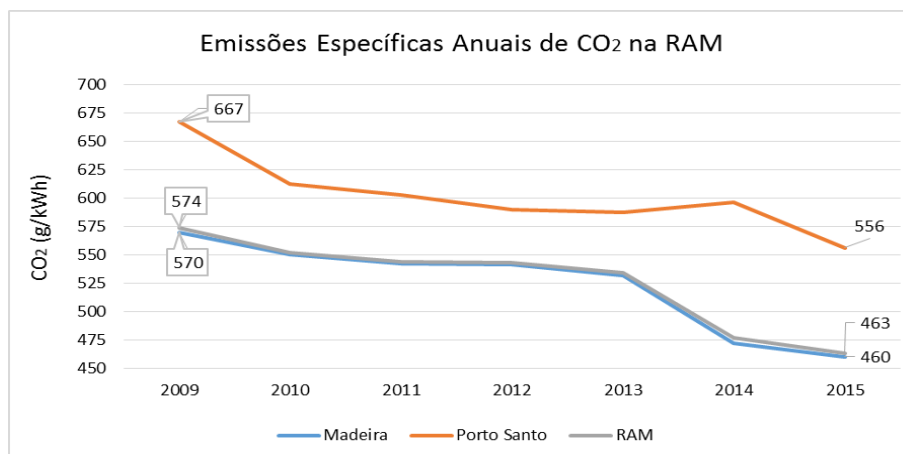


Figura 2.33 – Evolução das emissões específicas na RAM.

Fonte dos dados: (Empresa de Eletricidade da Madeira, 2016c; ERSE, 2016).

Comparativamente, a Região Autónoma dos Açores, apresentou em 2014, 481 gCO₂/kWh de emissões específicas, do agregado das nove ilhas (ERSE, 2016). Em Portugal Continental, as emissões específicas têm vindo a decrescer, de acordo com as metas propostas para a descarbonização do mercado. Desde 1995, que a liberalização do mercado de eletricidade em Portugal está em curso, atualmente todos os clientes de eletricidade em Portugal Continental podem escolher o seu fornecedor de energia elétrica coexistindo ainda em simultâneo o mercado livre e o mercado regulado (Costa, 2015). Existem portanto, diversos comercializadores de eletricidade em Portugal Continental, que têm de cumprir as recomendações da ERSE, relativamente à rotulagem da energia elétrica.

Na figura 2.34 são apresentados os valores das emissões específicas de CO₂ anuais dos comercializadores existentes no mercado português continental para o ano de 2014, e é de destacar o valor das emissões específicas do agregado da EDP Comercial, 235 gCO₂/kWh, principal operador no mercado livre em número de clientes (86% do total de clientes) e em consumos (cerca de 46% dos fornecimentos no mercado liberalizado) (ERSE, 2014, 2016).

Ano	2014	
REGIÃO	Continente	CO2 (g/kWh)
EDP Comercial	Empresas	338
	Empresas - Verde	0
	Residenciais e pequenos negócios	109
	Residenciais e pequenos negócios - Verde	0
	(agregado)	235
EDP Serviço Universal		122
Enat		145
Endesa		359
Galp Power		327
Gas Natural	Gas Natural Comercializadora	257
	Gas Natural Servicios	190
Iberdrola	Iberdrola Generación	357
	Iberdrola Portugal	111

Figura 2.34 – Emissões específicas anuais de CO₂ dos comercializadores.

Adaptado: (ERSE, 2016).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No ano de 2005, a representatividade das fontes de energia renovável no sistema electroprodutor da ilha da Madeira foi de 15,7% da energia elétrica total produzida, correspondendo a 136,5 GWh, enquanto as fontes não renováveis corresponderam a 727,4 GWh, representando os restantes 84,3%. A energia renovável foi proveniente de uma potência hídrica instalada de 74 MW, seguida da eólica com 10 MW e da valorização energética dos resíduos sólidos urbanos (VERSU) com 8 MW.

No ano de 2015, a representatividade das FER atingiu os 25,7% de energia elétrica total produzida, correspondendo a 828,2 GWh, representando, um crescimento de 10% da produção global numa década, ou seja, uma taxa anual de crescimento de 1%. Em 2015 a potência hídrica instalada alcançava os 50,7 MW, seguida da eólica, com 45,1 MW, a fotovoltaica com aproximadamente 20 MW e o SVERSU, com 8 MW. Este crescimento deveu-se essencialmente à forte implementação de sistemas fotovoltaicos e eólicos. Neste mesmo período verificou-se uma redução de 15,1% da energia elétrica produzida pelas centrais termoelétricas da ilha e, uma redução de 23,6%, da energia elétrica produzida pelas centrais hídricas.

A meta definida no PAES para as FER, em 2020, é de 50% da energia elétrica produzida e, para tal, estão colocados em marcha dois projetos: um de investigação, Avaliação do Potencial de Energia Geotérmica Estimulada na Madeira e outro em implementação, a Ampliação do Aproveitamento Hidroelétrico da Calheta. Esta ampliação terá um impacto na capacidade de produção de energia elétrica, de 30 MW e devido ao novo sistema reversível de bombagem permitirá, no futuro, a construção de um parque eólico de 25 MW. Outra das metas definidas no PAES é a redução das emissões de CO₂, em 20%, em relação a 2005, ano em que foram emitidas 526.241 tCO₂e.

Em 2015, foram emitidas 380.817 tCO₂e, o que representa uma redução de 28%, correspondendo a um fator de emissões específicas do SEPM de 460 gCO₂/kWh.

Em 2014, foi efetuada a introdução do gás natural na nave III da CTV que teve um papel importante na adaptação do SEPM às metas de redução das emissões de CO₂. Desde a sua introdução, já foi evitada a emissão de 73.000 tCO₂e e a poupança de 124 milhões de litros de fuelóleo.

3 ESTUDO DA RADIAÇÃO SOLAR NA ILHA DA MADEIRA

3.1 INTRODUÇÃO

O estudo da radiação solar na ilha da Madeira envolveu o tratamento e análise dos registos da rede de estações meteorológicas automáticas (EMAs) do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) e da Delegação Regional do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Para a realização deste estudo foi necessário reunir todos os registos existentes da Irradiação Solar Global (ISG), no período entre o primeiro mês completo de envio de dados e o mês de agosto de 2015. O tratamento e análise dos dados da ISG permitirá, numa fase avançada do estudo, comparar os dados da ISG das EMAs com os correspondentes na base de dados de radiação solar da ferramenta PVGIS e no *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*. Assim, é fundamental ter noção de quais os processos que influenciam a radiação solar, as técnicas de quantificação da radiação solar, os instrumentos de medição, os métodos de previsão da radiação solar, as bases de dados existentes e as suas metodologias.

3.2 CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS SOBRE A RADIAÇÃO SOLAR

A Radiação Solar que chega ao Planeta Terra é proveniente do Sol, e suporta direta ou indiretamente todas as formas de vida do nosso planeta. O Sol gera a sua energia a partir da reação nuclear de fusão, onde o hidrogénio é convertido continuamente em hélio. Nessa reação é libertada $3,8 \times 10^{20}$ MW de energia em todas as direções, o que representa um valor de 63 MW por cada metro quadrado de superfície do Sol (Sabbagh, 1977).

É a partir da energia solar que surgem quase todas as outras formas de energia utilizadas pelo homem (hídrica, solar, eólica, fóssil, ondas) figura 3.1. A energia hídrica resulta da evaporação que origina o ciclo da água, a energia solar surge a partir da captação da radiação solar, a energia eólica através da movimentação de massas de ar, a energia fóssil através da fotossíntese e da posterior conversão química surge o petróleo, gás natural, biomassa, carvão... Uma pequena fração dessa energia, aproximadamente uma hora seria capaz de alimentar o consumo mundial durante um ano.

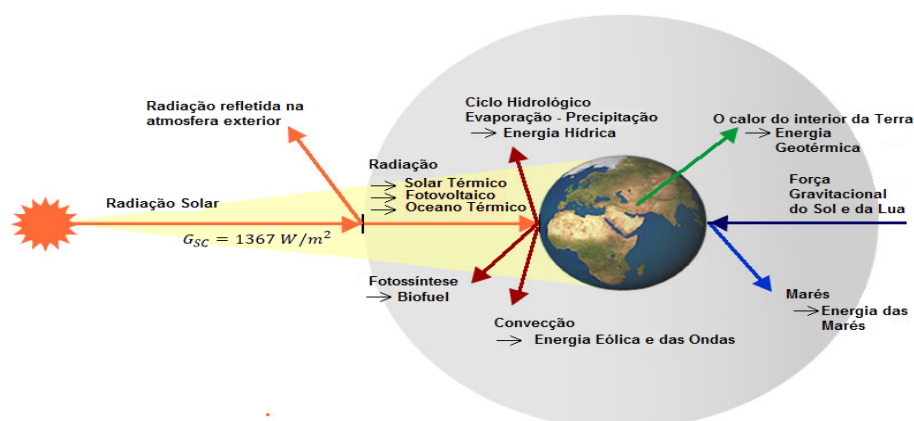


Figura 3.1 – Relação Terra – Sol.
Adaptado: (Green Rhino Energy, 2015).

3.2.1 RELAÇÃO ENTRE OS FACTORES ASTRONÓMICOS E METEOROLÓGICOS QUE INFLUENCIAM A RADIAÇÃO SOLAR NA SUPERFÍCIE TERRESTRE

A energia emitida pelo Sol transmite-se no espaço em forma de ondas eletromagnéticas com diferentes comprimentos de onda (λ). A radiação solar incidente sobre o topo da atmosfera terrestre é chamada da radiação solar extraterrestre. O espectro emissivo do Sol consiste num conjunto contínuo de ondas de diversos comprimentos de onda, os quais podem ser englobados em três regiões, o ultravioleta, o visível e o infravermelho. A primeira região, ultravioleta, compreende a faixa dos 100 nm até os 400 nm, de seguida a faixa do visível entre os 380 nm e os 760 nm e a última região, do infravermelho, acima dos 760 nm até 1 mm. Na tabela 3.1 estão especificadas para cada intervalo de comprimento de onda o espectro a que pertencem e o seu nome (ISO (International Organisation of Standardisation), 2007).

Tabela 3.1 – Algumas categorias importantes do espectro da irradiação solar.
Adaptado: (ISO (International Organisation of Standardisation), 2007).

Espectro	Comprimento de onda	Nome
Ultravioleta	$100 \text{ nm} \leq \lambda < 280 \text{ nm}$	UVC (ultravioleta C)
	$280 \text{ nm} \leq \lambda < 315 \text{ nm}$	UVB (ultravioleta B)
	$315 \text{ nm} \leq \lambda < 400 \text{ nm}$	UVA (ultravioleta A)
Luz Visível	$380 \text{ nm} \leq \lambda < 450 \text{ nm}$	Violeta
	$450 \text{ nm} \leq \lambda < 500 \text{ nm}$	Azul
	$500 \text{ nm} \leq \lambda < 570 \text{ nm}$	Verde
	$570 \text{ nm} \leq \lambda < 591 \text{ nm}$	Amarelo
	$591 \text{ nm} \leq \lambda < 610 \text{ nm}$	Laranja
	$610 \text{ nm} \leq \lambda < 760 \text{ nm}$	Vermelho
Infravermelho	$760 \text{ nm} \leq \lambda < 1400 \text{ nm}$	IR-A (próximo)
	$1,4 \mu\text{m} \leq \lambda < 3 \mu\text{m}$	IR-B (médio)
	$3 \mu\text{m} \leq \lambda < 1 \text{ mm}$	IR-C (distante)

É muito importante conhecer a distribuição espectral da radiação solar extraterrestre para compreender processos fotoquímicos entre outros. A compreensão do espectro da radiação solar permite estudar a implementação dos aproveitamentos energéticos tanto à superfície como no topo atmosfera. A figura 3.2 permite associar o espectro da radiação solar ao comprimento de onda das categorias nela contida, ultravioleta, visível e infravermelho.

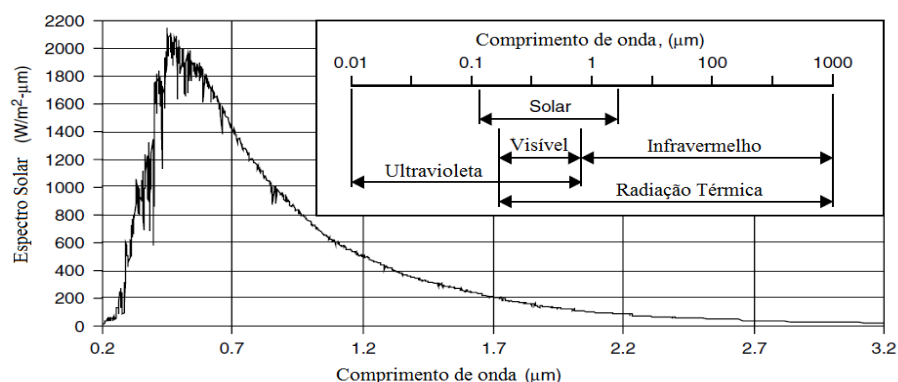


Figura 3.2 – Espectro da radiação eletromagnética.
Adaptado: (Kalogirou, 2013).

RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NO TOPO DA ATMOSFERA

A energia solar por unidade de tempo, quando a Terra está à distância média do Sol, recebida numa unidade de área de superfície normal ao sol (perpendicular à direção de propagação da radiação) fora da atmosfera é chamada de Constante Solar G_{SC} ou S . A quantificação desta constante é de difícil realização a partir da superfície da terra devido ao efeito da atmosfera. No entanto, *Langley* em 1981, com recurso a dados da radiação solar recolhidos a bordo de vários satélites, conseguiu calculá-la. Às unidades atribuiu o seu nome, *Langleys/minuto* (calorias por centímetro quadrado por minuto), que posteriormente viriam a ser alteradas pelo Sistema Internacional (SI) para Watts por metro quadrado (W/m^2) (Garg, 1982).

A radiação solar que chega ao topo da atmosfera (G_{on}), varia consoante, a proximidade do planeta ao sol, figura 3.3. No dia 3 Janeiro, quando o planeta se encontra mais próximo do sol, periélio, o planeta recebe cerca de $1422 W/m^2$, e no dia 4 de Julho, quando se encontra mais distante, recebe cerca de $1330 W/m^2$. Posto isto, segundo a Organização Mundial de Metrologia (WMO) adotou uma nova escala, chamada referência radiométrica mundial (WRR) onde definiu a constante solar com o valor de $1367 W/m^2$ (Iqbal, 2012).

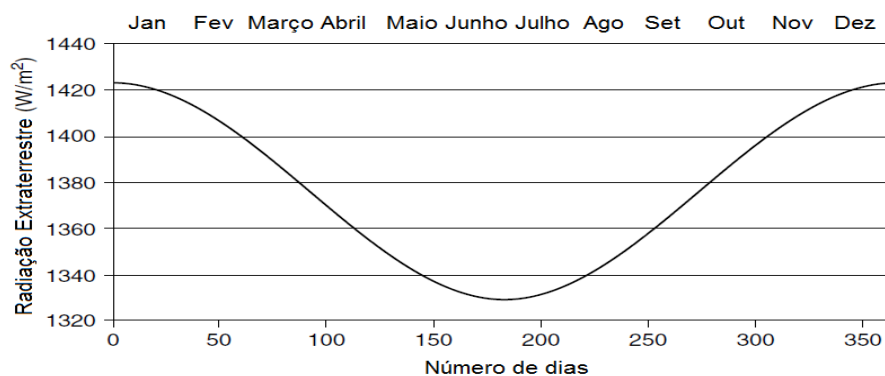


Figura 3.3 – Variação da Radiação solar acima da atmosfera ao longo do ano.

Adaptado: (Sabbagh, 1977).

Ao longo do ano, a radiação solar extraterrestre medida no plano normal à radiação no dia n do ano, G_{on} , varia entre os limites referidos anteriormente e pode ser calculada através da equação 2.

Equação 2 – Radiação Solar incidente no topo da atmosfera.

$$G_{on} = G_{SC} \times \left[1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{360 \times N}{365}\right) \right]$$

Onde:

G_{on} – Representa a radiação extraterrestre medida no plano perpendicular à radiação no dia n do ano (W/m^2);

G_{SC} – Constante Solar (W/m^2);

N – número do dia juliano.

A interação da radiação emitida pelo Sol com a atmosfera terrestre e posteriormente com a superfície terrestre sofre diversas alterações devido aos diversos processos a que é sujeita. Podemos qualificá-las em três grupos: alterações geométricas, sombreamentos na superfície e alterações por atenuação atmosférica.

ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS

As alterações geométricas compreendem o tempo, a correção latitude/longitude, os ângulos solares e a declinação. O Planeta Terra em torno do seu eixo polar, a cada 24 horas, e completa a translação sobre o Sol, num período de aproximadamente de 365,25 dias. O movimento da Terra em torno do Sol não é circular, mas resulta de um órbita elíptica. A excentricidade da órbita da Terra é muito pequena, igual a 0,01673, o que faz com que a distância Terra-Sol seja menor a 3 de janeiro (periélio) do que a 4 de Julho (afélio) (Kalogirou, 2013).

Durante a translação Terra-Sol o eixo polar está inclinado $23,45^\circ$, em relação à normal do plano elíptico. Esta inclinação causa a variação sazonal da radiação solar (originando as quatro estações). O ângulo referido é denominado de declinação solar (δ) e varia ao longo do ano entre $\pm 23,45^\circ$ visível na figura 3.4.

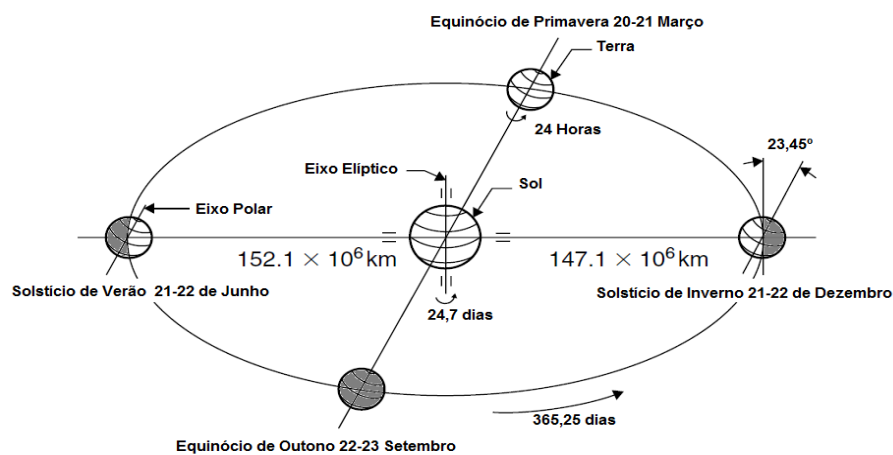


Figura 3.4 – A declinação solar e as quatro estações.

Adaptado: (Sabbagh, 1977).

Para caracterizar a radiação solar é necessário conhecer a posição do Sol no céu. Essa posição altera-se ao longo do dia e de dia para dia, conforme a figura 3.5.

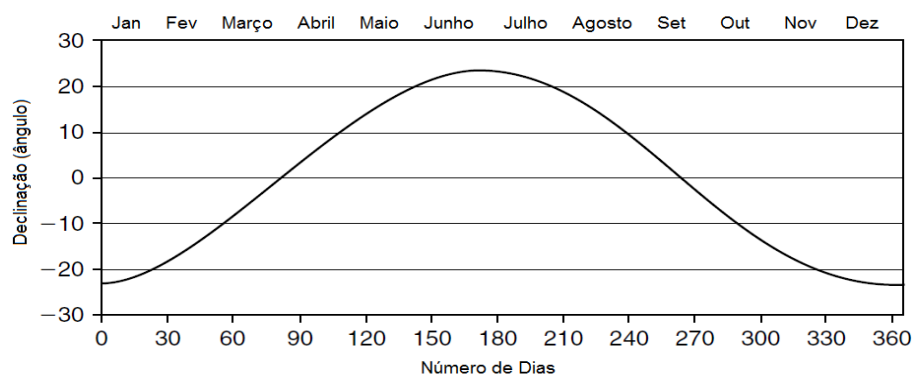


Figura 3.5 – Variação da declinação ao longo do ano.

Adaptado: (Sabbagh, 1977).

Na figura 3.6 é possível observar que devido à declinação solar, no solstício de verão, a 21 de junho, o sol atinge o ponto mais alto no céu e a maior duração do dia, a norte do trópico de caranguejo. Já no solstício de inverno, a 21 de dezembro, ocorre o inverso. Nos equinócios de primavera e outono, a 21 de março e 21 de setembro respetivamente, a duração do dia é igual à da noite.

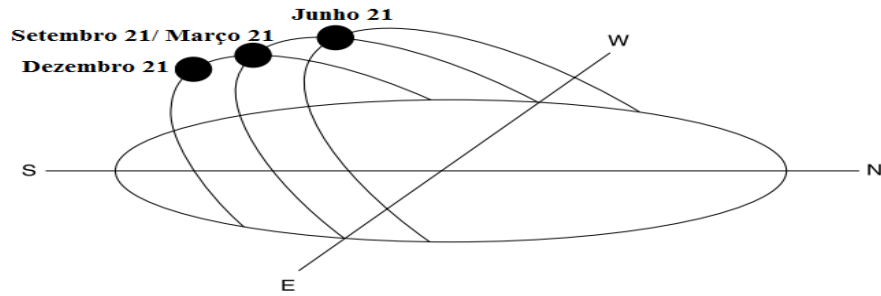


Figura 3.6 – Variação anual da altitude solar no hemisfério norte.

Adaptado: (Sabbagh, 1977).

É necessário conhecer o Tempo Solar Aparente (AST) para conhecer a energia proveniente do sol recebida num determinado local. O dia solar é o intervalo de tempo que o Sol demora a completar uma volta em torno de um ponto estacionário. O AST não coincide necessariamente com a “Hora Local” (HL), uma vez que a HL varia em função do meridiano do fuso horário local (LSTM- Local Standard Time Mean). Para calcular o meridiano do fuso horário local, equação 3, realizamos uma correção segundo a seguinte norma, por cada 15° de rotação da Terra significa uma correção de uma hora no “relógio local” (Sabbagh, 1977).

Equação 3 – Meridiano do fuso horário local.

$$LSTM = 15^\circ \times \Delta T \text{ GMT}$$

Onde o meridiano do fuso horário local é baseado no meridiano de Greenwich (GMT-Tempo Médio de Greenwich), sendo a sua longitude 0°. No entanto, é necessário converter a HL ao AST, aplicando duas correções (correção da equação do tempo (E_oT) e a correção à longitude (LC)).

Em primeiro lugar é necessário realizar a correção da equação do tempo, equação 4, que tem em conta as perturbações na taxa de rotação da terra que afetam o tempo que o sol cruza o meridiano do observador. A equação do tempo descreve a diferença, em minutos, entre o tempo solar e o AST que varia consoante o lugar e o dia do ano.

Equação 4 – Equação do tempo E_oT .

$$E_oT = 9,87 \times \sin(2 \times B) - 7,53 \times \cos(B) - 1,5 \times \sin(B)$$

Onde:

$$B = \left(\frac{360}{365} \right) \times (d - 81)$$

d , Representa o nº de dias desde o início do ano

Em segundo lugar, a correção da longitude (LC), constante de correção para a diferença de longitude entre o meridiano do observador (longitude) e o meridiano em que o tempo padrão local é baseado (GMT). O sol leva 4 minutos para atravessar 1° de longitude, ou seja, através da equação 5, é possível corrigir por cada grau de longitude (LSTM) quatro minutos ao tempo local solar.

Equação 5 – Equação de correção de longitude (LC).

$$LC = 4 \times LSTM$$

Onde:

$LSTM$ – Longitude do local.

O valor será positivo para longitudes a este do LSTM e negativo para oeste. A longitude é constante para um local. Posto isto, e, tendo em conta a equação do tempo e a correção da longitude podemos calcular o AST através da equação 6.

Equação 6 – Tempo Solar Aparente (AST).

$$AST = HL + 4 \times LSTM + E_0 T$$

Na figura 3.7 é apresentado a curva de correção do tempo ao longo de um ano, a preto e as duas que lhe dão origem.

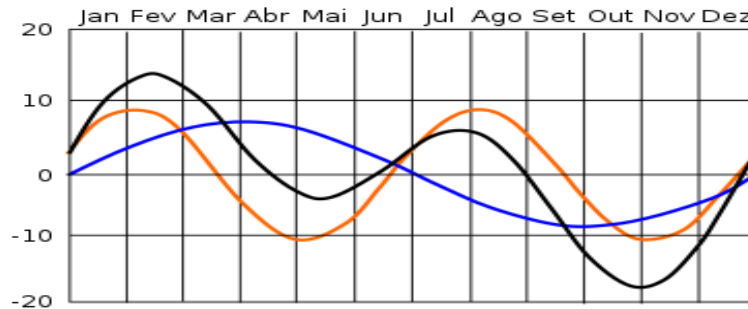


Figura 3.7 – Curva de correção do tempo.
Fonte: (CMAF/UL, 2010).

Para continuarmos a analisar a posição solar, figura 3.8, é importante analisarmos dois ângulos: o ângulo de altura solar (α) e o ângulo de azimute solar (z). Para calcular os ângulos referidos anteriormente é necessário definir antes o ângulo horário, do local em estudo, equação 7, que é o ângulo entre a projeção, no plano horizontal da linha que une o centro da Terra com o Sol e o meridiano do local. Por esta definição o ângulo horário antes do meio-dia solar o ângulo é negativo, ao meio-dia solar é 0° e depois do meio-dia é positivo (Sabbagh, 1977).

Equação 7 – Ângulo horário do local.

$$h = (AST - 12) \times 15$$

Onde:

AST representa o tempo solar aparente em horas;

15, representa os 15° de longitude por hora ($360^\circ/24h$).

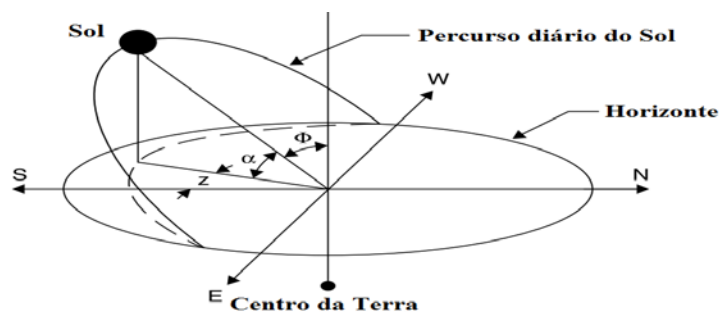


Figura 3.8 - Caminho diário aparente do sol no céu do nascer ao pôr-do-sol.
Adaptado: (Sabbagh, 1977).

O ângulo de altura solar (α) é o ângulo formado pelos raios solares e o plano horizontal, visível na figura 3.8. A altura solar está relacionada com o ângulo de zénite solar (ϕ), pois o ângulo de zénite é o ângulo entre os raios solares e a vertical, e é calculado segundo a equação 8 (Sabbagh, 1977).

Equação 8 – Ângulo de altitude solar (α).

$$\sin(\alpha) = \sin(L) \times \sin(\delta) + \cos(L) \times \cos(\delta) \times \cos(h)$$

Onde:

L , Representa a latitude do local, positivo para norte e negativo para sul;

δ , Representa a declinação da Terra;

α , Representa a ângulo de altura solar;

h , Representa o ângulo horário do local.

O ângulo de azimuth solar (z) é o ângulo formado pela projeção horizontal da linha perpendicular à superfície captadora e a linha que passa por esta e o sul geográfico, chamado de meridiano do lugar, visível na figura 3.8. O ângulo de azimuth assume o valor de 0° ao meio-dia solar, sendo positivo para oeste, indicando quantos graus é necessário desviar da direção do sul e é calculado segundo a equação 9 (Sabbagh, 1977).

Equação 9 – Ângulo de azimuth solar (z).

$$\sin(z) = \frac{(\cos(\delta) \times \sin(h))}{\cos(\alpha)}$$

Onde:

z , Representa o ângulo de azimuth do local;

δ , Representa a declinação da Terra;

α , Representa a altura solar;

h , Representa o ângulo horário do local.

A radiação solar ao incidir na superfície terrestre é caracterizada pelo seu ângulo de incidência (θ), que em relação ao plano horizontal, figura 3.9, é o mesmo ângulo de zénite solar (ϕ).

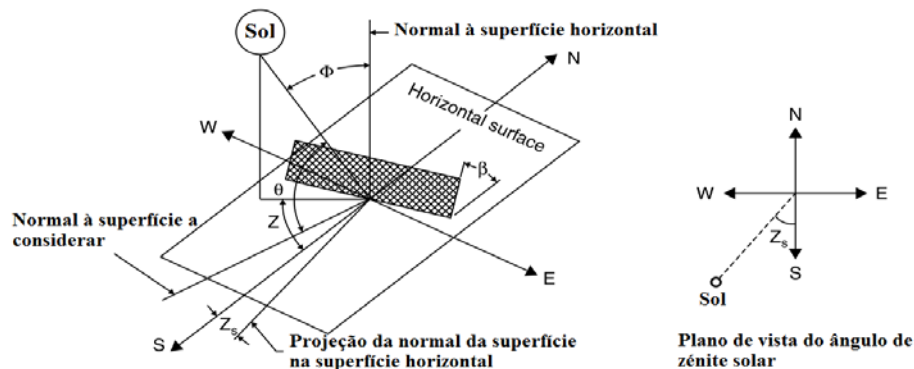


Figura 3.9 – Diagrama de ângulos solares.
Adaptado: (Sabbagh, 1977).

Na figura 3.9 é possível verificar a existência de dois ângulos que ainda não foram referidos, mas que apresentam elevada importância na implementação de sistemas de energia solar. São eles o ângulo de inclinação do painel (β) em relação à superfície horizontal e, o ângulo de azimuth da superfície a considerar (Z_s), ângulo entre a normal à superfície do verdadeiro sul, sendo designado como positivo para oeste. Estes dois ângulos são muito importantes na implementação de sistemas de energia solar pelo facto de que a

quantidade de radiação solar incidente na superfície dos coletores ser proporcionalmente relacionada com os mesmos. Assim, o acompanhamento solar, veio maximizar ao longo do ano a captação da radiação solar incidente. Existem vários tipos de seguimento solar, eixo horizontal (este-oeste, norte-sul), eixo vertical e, de dois eixos (Duffie, Beckman, & Worek, 2003).

SOMBREAMENTOS

Na implementação dos sistemas de energia solar, é muitas vezes necessário estudar os efeitos do sombreamento nos sistemas. Existem dois principais tipos de sombreamento, temporários e devido a estruturas próximas. O sombreamento temporário resulta da presença de neve, folhas e de sujidade. O sombreamento devido a estruturas próximas compreende todo o sombreamento causado tanto pela envolvente do edifício como por árvores próximas, edifícios, chaminés, pelos próprios módulos entre outros. Existem portanto, diversos tipos de problemas de sombreamento que ocorrem com frequência, pelo que, são necessários métodos para lidar com eles.

Assim, para determinar o sombreamento, é importante conhecer a projeção da sombra em função do tempo durante todos os dias do ano. Atualmente existem muitos modelos matemáticos que permitem estudar o sombreamento, no entanto, para aplicações rápidas e práticas existem métodos mais simples. O objetivo destes métodos não é estimar a quantidade de sombreado, mas sim determinar se uma posição sugerida, para a colocação dos módulos, é ou não adequada (DEM do Instituto Superior Técnico, 2004).

ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA

A radiação solar que atinge a superfície da terra apresenta um valor inferior ao G_{on} , devido aos processos de dispersão, reflexão e absorção que é submetida. Ao interagir com a atmosfera, uma parte dos raios originalmente incididos tornam-se dispersos ou não-direcionais e, a outra parte, é irradiada novamente para a atmosfera. A radiação dispersa que atinge a superfície da terra, é denominada de radiação difusa, uma vez que é proveniente da ação dos processos de dispersão e absorção provocados pelos diversos constituintes atmosféricos, nomeadamente, gases, líquidos, partículas sólidas e nuvens.

A absorção é o processo de dissipação de energia que se propaga pela estrutura molecular de uma substância, sendo dependente do comprimento de onda. A radiação solar que possui ondas de comprimento muito curto, raios X e raios gama, são absorvidos na ionosfera, em altíssima altitude. As ondas de comprimento na gama do ultravioleta são absorvidas pela camada de ozono (O_3), localizada entre 15 a 40 km, acima da superfície da terra. Já na baixa atmosfera, as faixas da radiação solar no infravermelho (comprimentos de onda longos) são absorvidas pelo vapor de água e dióxido de carbono, de modo que a radiação solar recebida pela superfície terrestre torna-se enriquecida com radiações de comprimentos de onda na faixa do visível, quando comparada com a situação, no topo da atmosfera.

A dispersão é o processo pelo qual as moléculas médias e pequenas em suspensão difundem, uma parte da radiação incidente na atmosfera, em todas as direções. A interação da radiação incidente com as moléculas presentes na atmosfera provoca a absorção de energia, por parte dos átomos, elevando o seu estado, a

excitado. Será emitida radiação eletromagnética de frequência igual à da onda incidente, e a direção de propagação da onda eletromagnética será alterada.

A *Dispersão de Rayleigh* refere que a eficiência da dispersão molecular é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda (λ^{-4}) e varia com a altitude. Em termos de transmissividade, para diferentes massas de ar em função dos comprimentos de onda, podemos verificar que, para comprimentos de onda $\lambda > 1000$ nm a transmissividade é aproximadamente de 1, ou seja, a energia solar atravessa a atmosfera sem interagir com as moléculas de ar seco, figura 3.10 (K. L. Coulson, 1971).

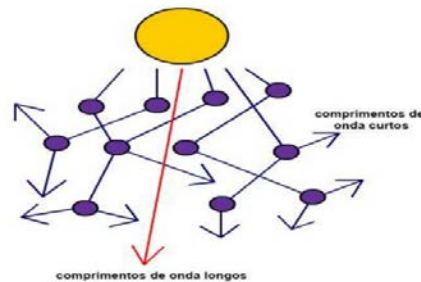


Figura 3.10 – Fenômeno de dispersão de Rayleigh e Mie.

Fonte: (Nascimento Neto, 2013).

A *Dispersão de Mie*, ao contrário do que ocorre com a *Dispersão de Rayleigh*, ocorre quando o comprimento de onda da energia é comparável ao tamanho das partículas com as quais a radiação se depara na atmosfera. A teoria de dispersão de Rayleigh é uma sub-teoria da teoria de Mie, pois apenas explica a dispersão causada por partículas menores do que o comprimento de onda da energia solar. Apesar da radiação solar sofrer de dispersão, por parte de todos os comprimentos de onda, apenas algumas faixas de comprimento de onda a absorvem. As moléculas mais importantes neste processo são o dióxido de carbono, o oxigênio, o azoto, os óxidos de azoto e os hidrocarbonetos. A atmosfera pode ser dividida em três conjuntos: ar seco, vapor de água e aerossóis. Estes elementos contribuem para atenuar a radiação solar até à superfície.

Em suma, a atenuação atmosférica da radiação solar depende igualmente, da distância a percorrer e das características do meio a atravessar, no entanto, se considerarmos a atmosfera uniforme e não estratificada, permite-nos estabelecer uma relação de proporcionalidade direta entre a diminuição da radiação solar e o aumento do ângulo de zénite solar com o aumento da Massa de Ar (AM). Assim, nos cálculos da radiação solar, uma Massa de Ar padrão é definida como a distância a percorrer para alcançar o nível do mar, equação 10, quando o Sol está no seu zénite (θ) (a vertical no ponto de observação). Ao nível do mar, AM igual a 1 quando o Sol está no seu auge e, AM igual a 2 para um ângulo zénite solar de 60° .

Equação 10 – Massa de ar padrão.

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

Para ângulos de zénite maiores, é necessário considerar e ter em conta o efeito da curvatura da Terra. Da mesma forma, que a radiação solar, fora da atmosfera da Terra possui uma AM igual a zero, visível na figura 3.11 (Kalogirou, 2013).

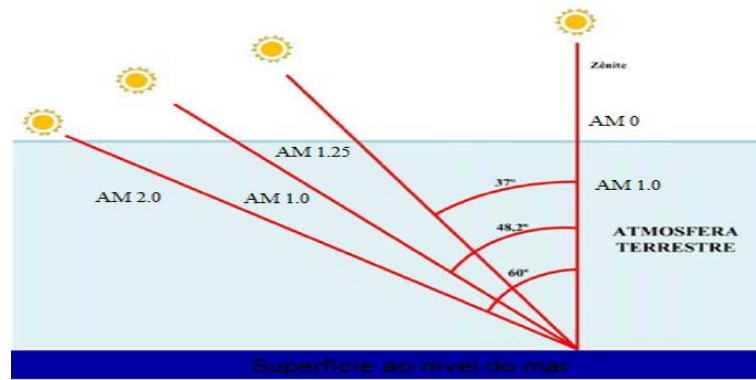


Figura 3.11 – Coeficientes de Massa de Ar (AM).

Adaptado: (Vilela, 2010).

Todos os raios que são recebidos diretamente do sol, a partir da atmosfera, sem interferência dos processos de dispersão, absorção e reflexão, constituem a radiação direta. A junção destas duas componentes, radiação direta e difusa, constituem a radiação global, de toda a energia recebida na superfície terrestre.

3.2.2 QUANTIFICAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

Os sensores de radiação eletromagnética podem ser classificados de acordo com o princípio físico ou mecânico envolvido na conversão do fluxo da radiação num sinal elétrico de fácil medição. Os sensores podem ser classificados em detetores térmicos e em detetores fotoelétricos.

SENSORES DE RADIAÇÃO, MODELO DE DETETOR TÉRMICO

O princípio de funcionamento destes sensores de radiação, por detecção térmica, assentam na transformação da radiação eletromagnética em energia térmica, provocando um aumento da temperatura. Esta categoria de sensores não selecionam o espectro, uma vez que, absorvem toda a energia captada. No entanto, esta característica, de não seletividade, é difícil de ser obtida completamente, devido às limitações dos materiais absorventes (geralmente corpos não negros). Os principais modelos de detetores térmicos são: o calorímetro, o termopar/termopilha e o bolómetro.

CALORÍMETRO

O detetor térmico do modelo calorímetro funciona segundo a premissa de que a quantidade da radiação incidente é determinada, através da variação da temperatura da superfície metálica de alta condutividade, pintada com uma tinta preta, não seletiva, de alta absorvidade. A radiação incidente na placa é convertida em calor, que posteriormente, pode ser medida de diversas formas. Este modelo de sensor, embora apresente uma fácil construção, apresenta uma baixa sensibilidade e resposta muito lenta.

TERMOPAR E TERMOPILHA

O detetor térmico, do modelo termopar/termopilha, funciona segundo a diferença de temperatura entre a junção de dois metais diferentes e uma junção de referência (termopar) causada pela absorção de radiação. A radiação solar incidente é absorvida a partir da superfície do termopar enegrecido, criando uma diferença de temperatura entre o centro da termopar (junção quente) e o corpo de piranómetro (junção fria). A

diferença de temperatura entre a junção quente e fria é convertida em força eletromotriz proporcional ao mesmo. A proporcionalidade entre o gradiente de temperatura e a força eletromotriz depende das propriedades dos metais. Este efeito é conhecido por *Efeito de Seebeck*. Um segundo termopar é colocado em estrela relativamente ao outro, protegido da radiação eletromagnética, com o objetivo de minimizar as variações de sensibilidade de acordo com a temperatura (prevenir os choques térmicos).

Os termopares podem não apresentar um sinal de saída, com tensão suficiente para ser medido, por isso, são colocados vários termopares, em série, formando uma termopilha, conforme representado na figura 3.12. Este modelo de detetores térmicos é o mais utilizado nos sensores de radiação (K. Coulson, 2012).

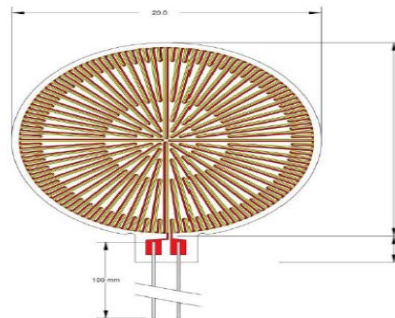


Figura 3.12 – Esquema de uma termopilha de um detetor térmico.
Fonte: (HuksefluxUSA, 2008).

BOLÓMETRO

O detetor térmico, modelo Bolómetro, é o instrumento mais sensível de entre os detetores de radiação não seletivos. É constituído por duas resistências, um fio de platina pintado com uma tinta preta não seletiva de alta absorvidade e outro pintado com uma tinta de alta refletividade, que variam com a temperatura, constituindo um dos braços de uma *Ponte de Wheatstone* equilibrada, figura 3.13. A tira preta está exposta à radiação, enquanto a outra é mantida no interior do equipamento (protegido da radiação). Devido à temperatura e aos coeficientes de expansão térmicos diferentes, as tiras entram em deformação, a preta mais que a outra. Este desequilíbrio na ponte é proporcional à radiação incidente (K. Coulson, 2012).

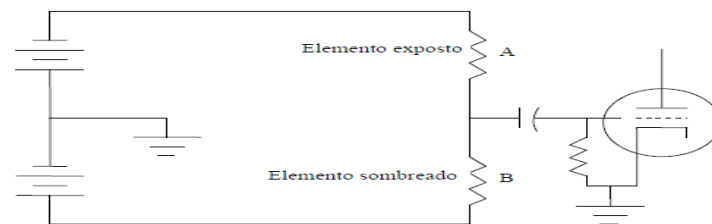


Figura 3.13 – Ponte de Wheatstone, conexões elétricas de um bolómetro.
Adaptado: (K. Coulson, 2012).

SENSORES DE RADIAÇÃO, MODELO DE DETETOR FOTOELÉTRICO

Este modelo de detetor fotoelétrico é constituído por um material semicondutor, normalmente o silício. O princípio de funcionamento destes detetores assenta na conversão da radiação incidente em corrente elétrica, onde são criados pares de eletrões-lacuna por absorção de fotões. O semicondutor tipo-p tem como particularidade a absorção de eletrões, enquanto o semicondutor tipo-n tem a de libertar eletrões. A junção do semicondutor tipo-p com o tipo-n possibilita o movimento dos eletrões, na presença da radiação solar,

originando a célula fotoelétrica. O processo de absorção da radiação provoca a diminuição da intensidade da radiação, à medida que ela penetra no material. Na região do espectro do infravermelho médio e infravermelho distante estes detetores não operam, uma vez que os fótons neste comprimento de onda não têm energia suficiente. O espectro funcional ocorre nas regiões do ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Estes detetores apresentam maior velocidade de resposta e maior sensibilidade, comparativamente aos detetores térmicos.

3.2.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

Para normalizar os tipos de instrumentos de medição da radiação solar, a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2008), através da comissão para instrumentos e métodos, definiu a seguinte nomenclatura para os sensores de radiação solar.

O **pireliómetro** (*i: pyrheliometer*) é a designação recomendada pela (WMO, 2008) para instrumentos concebidos para irradiância, numa superfície plana perpendicular à incidência do feixe solar direto, estando o sensor em condições de receber radiação proveniente de um campo de visão pequeno, com ângulo sólido equivalente ou um tanto maior que aquele do disco solar, considerando-se apenas o espectro solar. Fornece a medição da intensidade da radiação solar direta no plano normal, figura 3.14.



Figura 3.14 – Pireliómetro e seguidor solar da Kipp & Zonen.
Fonte: (Kipp & Zonen B.V., 2016).

O **Piranómetro** (*i: pyranometer, f: pyranomètre*) é a designação recomendada pela (WMO, 2008) para instrumentos concebidos para medir irradiâncias numa superfície plana, estando o sensor em condições de receber radiação proveniente de todo o hemisfério, considerando apenas o espectro solar. Uma vez instalado num plano horizontal, fornece dados da radiação solar global (direta + difusa), caso seja adicionado um instrumento auxiliar de sombreamento, permite obter dados da radiação solar difusa, figura 3.15.



Figura 3.15 – Piranómetro Kipp & Zonen.
Fonte: (Kipp & Zonen B.V., 2016).

O **Pirgeómetro** (*i: pyrgeometer, f: pyrgéometre*) designação recomendada pela (WMO, 2008) para instrumentos concebidos para medir irradiâncias numa superfície plana, estando o sensor em condições de receber radiação proveniente de todo o hemisfério, considerando apenas o espectro terrestre. Uma vez

instalado, num plano horizontal e voltado para cima, mede a radiação atmosférica, com todas as suas componentes, absorvida por uma superfície negra na temperatura ambiente, figura 3.16.



Figura 3.16 – Pirgeómetro Kipp & Zonen.
Fonte: (Kipp & Zonen B.V., 2016).

O **Pirradiómetro** (*i: pyrradiometer*) designação recomendada pela (WMO, 2008) para instrumentos concebidos para medir irradiâncias numa superfície plana, estando o sensor em condições de medir a radiação total (solar, atmosférica), considerando tanto o espectro solar quanto o espectro terrestre, figura 3.17.



Figura 3.17 – Pirradiómetro ou Radiómetro “Líquido” Kipp & Zonen.
Fonte: (Kipp & Zonen B.V., 2016).

A ARQUITETURA DOS INSTRUMENTOS

Para fazer face a alguns defeitos nas respostas efetuadas pelos sensores, uma vez que estes dependem de parâmetros tais como: a temperatura, o comprimento de onda do fluxo incidente, a magnitude do sinal incidente entre outros, foram desenvolvidas soluções que nos explicam a aparência dos sensores de radiação. Uma dessas soluções implementadas foi a inclusão de duas cúpulas de vidro, também denominadas de difusor/esfera integradora, na arquitetura do instrumento, com o objetivo de espalhar uniformemente a radiação incidente, sobre toda a área sensível do dispositivo, visível na figura 3.18. A inclusão do difusor, na arquitetura dos instrumentos, permite minimizar os erros de variação de temperatura por ação do vento, chuva e das perdas térmicas para o ambiente. As cúpulas de vidro permitem proporcionar uma transmissão da componente solar direta equitativa, para qualquer que seja a posição do sol, na esfera celeste. Igualmente importante é a inclusão nos corpos dos instrumentos de um exsicador, com a função fulcral de absorver humidades e dissipar o orvalho das cúpulas.

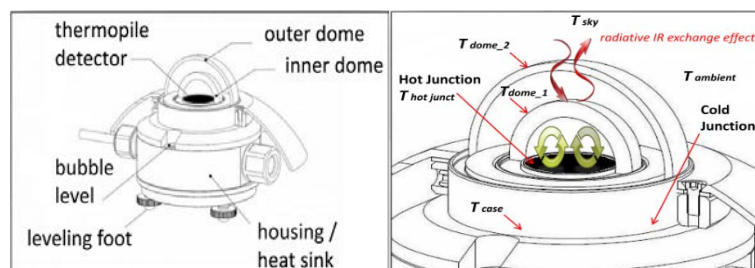


Figura 3.18 – Piranómetro com difusor/ esfera integradora.
Fonte: (HuksefluxUSA, 2008).

Outra solução implementada é o filtro de densidade neutra que permite atenuar o fluxo de radiação incidente sobre o sensor, sem que ocorram alterações na distribuição espectral, com o objetivo de acomodar uma larga faixa do fluxo de radiação, dentro dos limites de operação dos sensores, limites esses onde, o sensor tem uma resposta linear.

Relativamente à intensidade da radiação solar incidente, para que esta seja corretamente analisada é, necessário obedecer à *Lei de Lambert*, onde é referido que a radiação incidente sobre uma superfície, varia de acordo com o cosseno do ângulo formado, com o plano horizontal.

Outro parâmetro importante a ter em conta é a temperatura que pode afetar a resposta, a sensibilidade do sensor e a resposta espectral. Uma forma de a atenuar é com recurso à utilização de sistemas de compensação térmica. A temperatura nos fotodíodos de silício, pode provocar num intervalo espectral entre os 500 a 900 nm, abaixo de 500 nm a resposta sofre uma alteração de - 0,4%/°C e aumenta significativamente acima de 900 nm chegando a 1,5%/°C.

CLASSIFICAÇÃO DOS INSTRUMENTOS SEGUNDO A NORMA ISO 9060 E A WRR

Os diversos tipos de instrumentos mencionados, no ponto anterior, e os descritos no ponto seguinte podem ser classificados segundo a norma ISO 9060. No entanto, quem inicialmente propôs uma classificação, para os instrumentos de medição de radiação solar, foi a WMO, onde os instrumentos estavam agrupados segundo três classes distintas: alta qualidade, boa qualidade e qualidade moderada (WMO, 2008). A metodologia utilizada pela WMO foi aceite, revista e publicada pela Organização Internacional de Normalização (ISO), com o número 9060, onde enquadrou os instrumentos, segundo as suas características, em três categorias diferentes:

- **Secondary Standard** – Alta qualidade, alta precisão.

Aplicações: Indicado para centros especializados; testes de PV, CPV e CSP.

- **First Class** – Boa Qualidade.

Aplicações: Estações meteorológicas operacionais e para investigação.

- **Second Class** – Qualidade Moderada.

Aplicações: Solução económica para medições de rotina em estações meteorológicas e testes de campo.

CALIBRAÇÃO DOS PIRANÓMETROS

Os piranómetros devem ser calibrados regularmente para evitar uma base de dados com incertezas e assim prejudicar as séries temporais dos registos e os estudos de validação dos modelos de radiação. Na calibração de um piranómetro é necessário: calcular o fator de calibração e a sua dependência com a temperatura, o nível e distribuição espectral e angular, da irradiância, e a inclinação do instrumento. Existem alguns métodos para efetuar este procedimento, alguns deles aprovados pelas normas ISO, enumerados seguidamente ou através de medidas, em laboratório, com recurso a uma fonte luminosa artificial:

- Calibração do piranómetro utilizando um pireliómetro (*ISO 9846*);
- Calibração do piranómetro comparando-o com um piranómetro de referência (*ISO 9847*);
- Para efetuar a calibração de pirheliómetros é normalmente realizada por comparação com um pirheliómetro de referência (*ISO 9059*).

O sinal de output de ambos os instrumentos é afetado pelo fator de calibração de modo a obter valores de radiação nas unidades do SI (W/m^2). A responsabilidade pela calibração dos instrumentos radiométricos cabe aos centros regionais e nacionais de radiação. O Centro de Radiação Mundial (WRC) em Davos é o responsável por manter a referência básica dos instrumentos do Grupo Mundial *Standard* (WSG) que são utilizados para estabelecer a Referência Radiométrica Mundial (WRR). A cada cinco anos é organizada uma comparação internacional onde os centros regionais comparam os seus padrões com o WSG, e os seus fatores são ajustados para o WRR. Assim, periodicamente o WRR é transmitido aos centros nacionais para que estes possam calibrar os seus instrumentos de rede de acordo com os seus próprios padrões (WMO, 2008).

3.2.4 DADOS HISTÓRICOS DOS RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVÁVEIS

Compreender a estrutura de tempo ou período de registo, associado a um recurso energético renovável (solar, eólico, etc.) e outros dados meteorológicos é importante para a realização de análises úteis ao estudo, projeção e implementação de qualquer projeto nesta área. As bases de dados de parâmetros meteorológicos apresentam flutuações que podem variar de segundos a anos. Os dados de longo prazo podem ser representativos do clima, se o período de coleta de dados registados for de, pelo menos 30 anos. Este período foi definido pela comunidade meteorológica, na Conferência Internacional de Meteorologia, ocorrida em Varsóvia em 1933, como sendo o suficiente para refletir as tendências climáticas, de longo prazo, e filtrar as flutuações interanuais, de curto prazo, e as anomalias.

Em climas típicos, as variáveis meteorológicas de superfície (temperatura, pressão, precipitação, etc.) são recalculadas década a década. O termo típico não é equivalente à média e tem um significado específico na comunidade meteorológica e climatológica, ou seja, refere-se à média de 30 anos de um parâmetro observado e que é atualizado, a cada 10 anos.

Em 1978, foi criado pelo Laboratório Nacional Sandia, nos Estados Unidos, o conceito de TMY (Ano Meteorológico Típico), 8760 registos horários da radiação solar e de outros elementos meteorológicos que permitem efetuar comparações de desempenho de tipos de sistemas e configurações para um ou mais locais. A primeira base de dados TMY englobava dados meteorológicos de longo prazo, dos anos de 1952 a 1975, de 248 locais dos Estados Unidos. Estes dados foram disponibilizados pelo SOLMET/ERSATZ criado em meados da década de 1970 onde reuniu nesta plataforma as melhores medições de radiação solar disponível em 26 estações, operadas pelo Serviço Nacional de Meteorologia, e através do modelo ERSATZ foram criados dados, de forma a expandir a cobertura de dados, para as 248 estações. Os dados criados resultaram das medições e modelações das séries temporais dos dados meteorológicos de superfície, preenchimento e interpolações devido, a lacunas ou erros existentes nos arquivos históricos (Sengupta et al., 2015).

Sendo o TMY, o Ano Meteorológico Típico, e constituído por 8760 dados horários, também representado por doze meses típicos, de um longo prazo de 30 anos de análise de dados (1952 a 1975), a sua seleção, ocorreu em parte, através da comparação das funções de distribuição cumulativas ponderadas de nove elementos de dados, apresentados na tabela 3.2, para a distribuição a longo prazo.

Tabela 3.2 – Fatores de ponderação aplicados a distribuições cumulativas.

Fonte: (Sengupta et al., 2015).

Version	Temperature						Wind Velocity		Solar Radiation	
	Dry Bulb			Dew Point						
	Max.	Min.	Mean	Max.	Min.	Mean	Max.	Mean	GHI	DNI
TMY	1/24	1/24	2/24	1/24	1/24	2/24	2/24	2/24	12/24	NA
TMY2-3	1/20	1/20	2/20	1/20	1/20	2/20	1/20	1/20	5/20	5/20

Examinando a soma ponderada das 13 *Estatísticas de Finkelstein-Schafer*, para cada ano, e a sua caracterização de persistência pela frequência e o comprimento acima e abaixo dos percentis, de longo prazo fixo, resultou em 5 anos de candidatos, para cada mês em questão. Depois a seleção final de um mês típico meteorológico (TMM) foi um pouco subjetiva, onde os anos com pequenas somas ponderadas estatísticas (pequenos desvios), e as típicas estruturas executas foram escolhidas. O TMY veio permitir a modelação grosseira de sistemas de conversão de energia renováveis, uma vez que apresentam variações diurnas e sazonais naturais e representam as condições climáticas anuais, típicas de um local (Cebecauer & Suri, 2015).

O ficheiro TMY não permite detetar fenómenos meteorológicos extremos de forma a serem utilizados na conceção de sistemas e dos seus componentes para satisfazer as necessidades mínimas nessas condições meteorológicas detetadas. Este conjunto de dados TMY também não deve ser utilizado para prever o tempo ou recursos solares, para um determinado período de tempo, nem ser utilizado como base adequada para avaliar a produção de energia em tempo real ou na elaboração detalhada de um parque energético.

Posteriormente, em 1994, o NREL desenvolveu o TMY2 utilizando dados provenientes da nova base de dados NSRDB, em 1992, com registos provenientes de 1961 a 1990. A NSRDB consistia numa série horária completa modelada (93%) e em dados de radiação solar medidos (7%) para 239 locais, nos Estados Unidos.

O modelo utilizado para o NREL modelar esta base de dados foi o METSTAT. O NSRDB é responsável pela caracterização de qualquer mudança climática, entre 1975 e 1990, disponibilizando valores mais precisos de radiação solar, uma vez que mais de 90% dos seus dados terem sido modelados, utilizou procedimentos mais rigorosos para avaliar a qualidade dos dados e melhorou os métodos de calibração dos seus instrumentos.

Em suma, a comparação entre as bases de dados existentes (SOLMET/ERSATZ e NSRDB) incentivou a criação da versão TMY2. No contexto anual, 40% das estações do NSRDB e do SOLMET/ERSATZ estavam em desacordo, acima de 5% em valores de GHI. Algumas estações apresentavam divergência, até 18%. Para o DNI, 60% das estações apresentavam discordância, na base de dados, em mais de 5%, tendo algumas atingido o patamar dos 33%. Esta diferenciação, entre as bases de dados era superior, se fosse analisado numa escala temporal mensal.

Em 2007, o NREL lançou um novo ficheiro TMY, apresentou dados de entrada da base de dados NSRDB de 1961-1990 (239 locais) e da atualização da base de dados NSRDB/SUNY de 1991-2005 (1454 locais). O TMY3 foi então projetado para maximizar o número de estações e o número de anos necessários para caracterizar as condições típicas. Nos locais, onde estão disponíveis dados para os 30 anos (239 locais da NSRDB), o período de tempo de base para algoritmo TMY abrange 1976-2005. Para os restantes locais, o período de tempo de base abrange 1991 a 2005.

O procedimento de elaboração do TMY3 e TMY2 foi semelhante ao desenvolvido pelo Laboratório Nacional Sandia aquando da criação do TMY original. Os critérios de ponderação sofreram algumas alterações, conforme é visível na tabela 3.2, os critérios de persistência também sofreram uma pequena mudança para permitir acomodar a seleção de um TMM com períodos de registos com menos anos, e o código de computador que dava prioridade à seleção de meses com dados de registos solares porque menos de 1% dos registos dos dados presentes na base de dados atualizada de NSRDB 1991-2005 contém dados medidos (Wilcox & Marion, 2008).

O efeito dessas mudanças entre o algoritmo do TMY2 e o do TMY3 foram avaliados como parte do processo de produção do TMY3. No contexto de produção de conjuntos de dados, com características semelhantes, estes efeitos eram pequenos. Na prática, no entanto, existem diferenças nos recursos solares aparentes entre os dados disponíveis como o TMY2, TMY3, e as médias anuais de 8 anos da base de dados NSRDB/SUNY.

BASE DE DADOS DA RADIAÇÃO SOLAR NA EUROPA

O conhecimento do recurso de energia solar é essencial para o planeamento e operação de sistemas de energia solar. Nos últimos anos uma série de bases de dados com informações sobre o recurso solar têm sido desenvolvidas por toda a Europa, como é o caso dos seguintes projetos (Sengupta et al., 2015):

- Atlas Europeu da Radiação Solar (ESRA);
- SoDa Services (Services for Professionals in Solar Energy and Radiation);
 - HelioClim (HC1; HC2; HC3; HC4_2017).
- Satel-Light (The European Database of Daylight and Solar Radiation);
- SWERA/UNEP (Solar and Wind Resource Assessment);
- PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System);
- PVSAT (Intelligent Performance Check of PV System Operation based on Satellite Data);
- Envisolar (Environmental Information Services For Solar Energy Industries).

Além das bases de dados referidas anteriormente, também foram criados serviços nacionais como o Meteonorm pela Meteotest, da Suíça e o SOLEMI pelo DLR, na Alemanha. Isto levou a que existam várias bases de dados diferentes, desenvolvidos paralelamente com diferentes abordagens, incluindo os dados de satélite que exploram. Esta diversidade de fontes de informação e de produtos de radiação solar estavam fragmentados, com acesso descoordenado e com uma incerteza sobre a qualidade. Assim surgiu o projeto MESoR, em julho de 2007, com o objetivo de eliminar a incerteza e melhorar a gestão do conhecimento do

recurso de energia solar. Os resultados de iniciativas, em larga escala na Europa, do passado e do presente, foram integrados, padronizados e divulgados de forma harmonizada, para facilitar a sua efetiva exploração pelas partes interessadas (German Aerospace Center et al., 2010).

Atualmente existem muitas mais plataformas que visam disponibilizar soluções à indústria de energia solar, como é o caso do SolarGIS e da IRSOLav/CIEMAT. O SolarGIS da GeoModel Solar é um sistema de informação geográfica que combina dados de recursos solares e dados meteorológicos com um sistema de aplicativo baseado na web para apoiar o planeamento, desenvolvimento e operação de sistemas de energia solar. Em 2013, foi novamente considerado como a fonte de dados com menor bias global, menor desvio médio bias e menor RMSD de entre, os 18 locais de validação, na Europa e Mediterrâneo (Ineichen, 2014).

O IrSOLav/CIEMAT é uma empresa de base tecnológica promovido pela CIEMAT especializada na área de consultoria e serviços técnicos no domínio da avaliação do recurso solar e da sua caracterização. O seu banco de dados foi desenvolvido a partir imagens de satélites (MSG, GOES, MTSAT, MODIS) e modelados através de uma versão modificada do modelo Heliosat-3, desenvolvido e validado pela CIEMAT com mais de 30 estações radiométricas, na Península Ibérica (Ineichen, 2014).

3.2.5 MODELOS DE PREVISÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

A integração de uma grande quantidade de fontes de energia intermitentes, como é o caso da energia fotovoltaica ou da energia eólica, na rede elétrica, coloca desafios técnicos, tanto nos sistemas de energia de grande escala, como também, nos de pequena escala devido à sua natureza variável. As energias renováveis têm apresentado uma taxa de crescimento exponencial pelo que a sua modelação, previsão e predição da irradiância solar é cada vez mais importante. As previsões relativas à produção de energias renováveis são especialmente úteis aos operadores/gestores das redes elétricas de forma a estimar as reservas, programar o sistema elétrico, gerir os congestionamentos, coordenar a energia renovável com o armazenamento, ou para negociação nos mercados de eletricidade. Os primeiros estudos que surgiram eram no âmbito da previsão de energia eólica, em meados dos anos 80, no entanto, nas últimas décadas verificou-se um crescimento, na pesquisa, na área da previsão da irradiação solar e, embora menor, na previsão de produção fotovoltaica. Dado que a potência produzida, a partir de uma central fotovoltaica, está diretamente relacionada com a radiação solar global incidente no local, então as incertezas associadas à previsão da radiação solar, refletem-se diretamente na previsão da produção solar (Diagne, David, Lauret, & Boland, 2012).

Os métodos de previsão da radiação solar dependem da aplicação, dos requisitos correspondentes em relação ao horizonte de previsão (intra-hora, intra-dia e dias à frente) e resolução espacial e temporal, diferentes dados e modelos de previsão são apropriados, conforme é visível na figura 3.19.

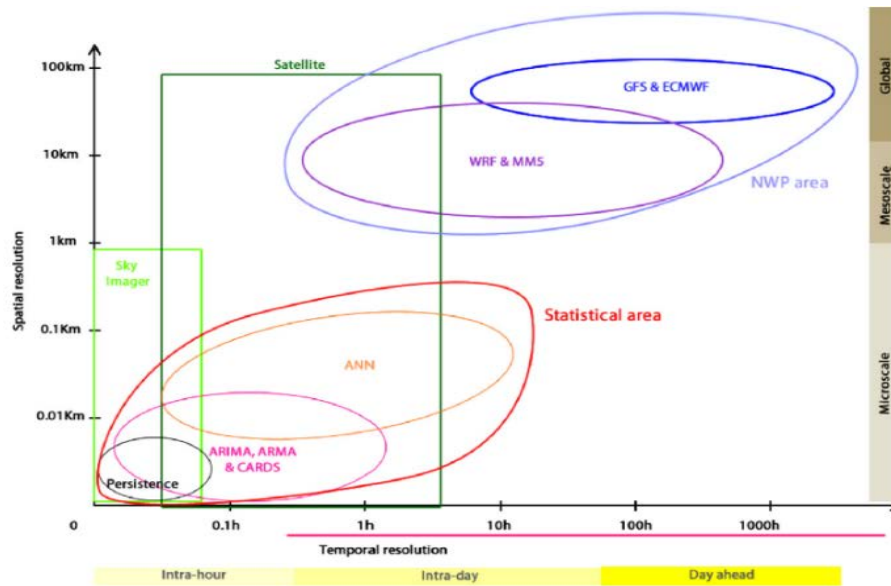


Figura 3.19 – Classificação do modelo de previsão baseado na resolução espacial e temporal.

Fonte: (Diagne, David, Lauret, & Boland, 2013).

Previsões, numa escala temporal intra-hora, com altas resoluções espaciais e temporais, exige observações no local da irradiância e/ou das condições das nuvens.

- Os modelos estatísticos são baseados na análise de séries cronológicas de ISG, sendo aplicados, nas escalas de tempo de muito curto prazo (intra-hora) até algumas horas à frente (intra-dia). Os modelos de séries temporais beneficiam da alta autocorrelação, para curtos períodos de tempo, em séries temporais de ISG, no entanto, mudanças nas condições das nuvens, como por exemplo, o aproximar de nuvens, não pode ser previsto.
- A caracterização das nuvens e o seu movimento, num determinado local, pode ser obtido através de imagens do céu, a partir das estações terrestres. Estas observações permitem extrapolar as condições futuras das nuvens e da irradiância com uma resolução temporal de alguns segundos até alguns minutos e uma resolução espacial na gama de 10 m até 100 m.
 - Previsões, numa escala temporal de até várias horas à frente, são operacionalmente derivados através da análise e extrapolação das nuvens e do seu movimento a partir de imagens de satélite que têm uma ampla cobertura. As resoluções espaciais são de aproximadamente 1 km para 5km no que diz respeito à atual geração de satélites geostacionários e as imagens por estes captados são geradas a cada 15 minutos para 30 minutos.
 - Para previsões, com horizontes temporais mais longos, de várias horas a vários dias à frente, os modelos de previsão numérica do tempo (NWP) são os utilizados. Estes modelos preveem as mudanças dinâmicas da atmosfera, incluindo a formação e a dissolução de nuvens, bem como advecção, através de uma abordagem física. Os modelos NWP descrevem os processos físicos e dinâmicos da atmosfera por resolução numérica das equações que governam a atmosfera numa grelha a partir das condições iniciais observadas.

Em suma, os métodos de previsão podem ser agrupados em duas áreas, a área estatística, baseada na análise das séries temporais e, na área física, baseada em variáveis explicativas (média horária do deslocamento das nuvens e da direção derivada da atmosfera) de forma a prever a irradiação solar global.

A aplicação dos modelos estatísticos é benéfico para todos os horizontes, que vão desde a previsão de muito curto prazo, com os modelos baseados nas séries temporais, com base em medições locais, até as previsões de vários dias à frente aplicando os modelos estatísticos de output, na saída de modelos NWP, para refinamento local. Qualquer que seja o modelo aplicado para previsão, os erros, em parte, estocásticos e sistemáticos permanecem. Esses erros podem ser reduzidos com modelos estatísticos, que aprendem com conjuntos de dados históricos de irradiação prevista, medida ou derivada de satélites. Em particular as abordagens híbridas que combinam modelos diferentes, com abordagens de aprendizagem estatística, que permitem uma montagem ideal de dados de entrada diferentes, dependendo do horizonte de previsão e da situação meteorológica.

PREVISÃO DA IRRADIÂNCIA A PARTIR DOS VETORES DESLOCAMENTO DAS NUVENS

Para horizontes a curto prazo, a mudança temporal em padrões de nuvens é fortemente influenciada pela advecção horizontal, com a forma das nuvens muitas vezes permanecendo relativamente estáveis. Assim, as técnicas de caracterização das nuvens num determinado momento é um procedimento fulcral para modelação e previsão da radiação solar. O desempenho deste método de previsão é degradado quando os processos de formação e de dissipação das nuvens num local, como uma forte convecção térmica, é dominante sobre a advecção da nuvem.

A previsão da irradiação a partir dos vetores deslocamento das nuvens compreende os seguintes passos:

- Através de satélites geoestacionários e de estações terrestres é possível captar imagens do céu, de forma a determinar e prever as condições da irradiação solar, num local;
- Assumindo as estruturas das nuvens como estáveis e as propriedades óticas para as escalas temporais e espaciais consideradas, o vetor deslocamento da nuvem é calculado através de duas imagens consecutivas;
- Para prever as condições futuras de nuvens, os vetores deslocamento calculados são aplicados na última imagem da nuvem disponível. O movimento da nuvem é extrapolado usando uma suposição adicional da persistência da velocidade das nuvens e velocidade;
- As previsões de um local específico da irradiação solar são deduzidas a partir das previsões das imagens de nuvens.

PREVISÕES USANDO IMAGENS DE ESTAÇÕES TERRESTRES (SKY IMAGERS)

Para realizar previsões, com alta resolução temporal e espacial, numa escala intra-horária, as previsões NWP e baseadas em imagens de satélite são atualmente inadequadas, por isso as observações terrestres vieram preencher esta lacuna na previsão e fornecer uma visão sub-quilómetro da nebulosidade sobre o local de estudo (Diagne et al., 2013).

Esta técnica possui o potencial de capturar as mudanças bruscas da radiação solar, muitas vezes referido como *ramps*, numa escala temporal de minutos ou mesmo inferior. No entanto, o horizonte máximo possível da previsão depende fortemente da velocidade da nuvem e é limitado pelo tempo que a nebulosidade monitorizada passa zona de interesse (Diagne et al., 2013).

A cobertura das nuvens pode ser resolvido com um elevado detalhe, permitindo detetar a cobertura parcial das nuvens, em grandes instalações fotovoltaicas de forma a modelar e a realizar a previsão, figura 3.20. Os horizontes máximos de previsão depende fortemente das condições das nuvens, da sua altura e da velocidade. É igualmente limitador o tempo em que o campo de nuvens passou o local ou a área de interesse, normalmente acima dos 15 minutos até os 30 minutos, à frente.

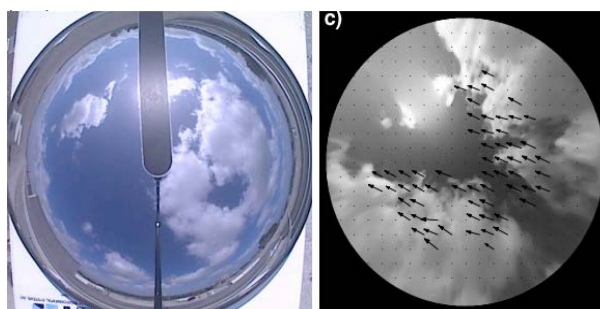


Figura 3.20 – Imagem total do céu (esquerda) e vetores movimento das nuvens (direita).

Fonte: (Glassley et al., 2010).

PREVISÕES USANDO IMAGENS OBTIDAS POR SATÉLITE

As imagens de satélite são captadas por satélites geostacionários que têm um movimento circular com uma velocidade que permite-lhes estar sempre por cima do mesmo ponto da Terra, e assim captar imagens da mesma área na superfície terrestre. Os padrões das nuvens são detetados, tanto a partir de imagens no espectro visível, como no infravermelho. As imagens de satélite apresentam uma boa resolução temporal e espacial, e são continuamente disponibilizadas para o mundo inteiro.

Os vetores de deslocamento das nuvens são derivados através da identificação de padrões de nuvens em duas imagens consecutivas. O estudo do panorama das nuvens é efetuado através da análise das imagens retangulares, geralmente 90 km por 90 km, grande o suficiente para conter as informações sobre as estruturas das nuvens temporalmente estáveis e pequeno o suficiente para que o deslocamento das nuvens possa ser descrito por um simples vetor. Os vetores de deslocamento derivados são aplicados à última imagem captada de forma a captar as condições futuras de nuvens. Depois é aplicado um filtro de suavização à imagem prevista para eliminar estruturas de pequena escala que variam aleatoriamente. Finalmente, a irradiância é derivada a partir das imagens de índice de nebulosidade previsto segundo o método Heliosat, esquematicamente explicado na figura 3.21. De notar que, relativamente ao cálculo do índice de nebulosidade, as variáveis (ρ , ρ_{ground} e ρ_{cloud}) representam a refletividade, medida na imagem prevista, no solo e da nuvem, respetivamente.

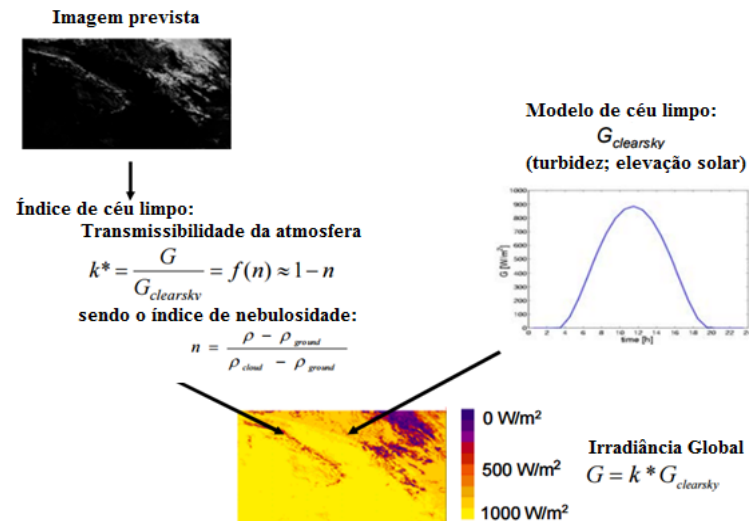


Figura 3.21 – Esquema do método Heliosat2 a partir de imagens do satélite METEOSAT.
Adaptado: (Mayer, Wald, Poissant, & Pelland, 2008).

A elevada duração de tempo na aquisição de duas imagens consecutivas não permite efetuar previsões para horizontes temporais inferiores a 30 minutos. Para previsões, a nível local, esta abordagem também não é a mais apropriada. No entanto, maior área de cobertura significa que o campo de deslocamento das nuvens pode ser projetado para a frente, ao longo de períodos de tempo, mais longos.

Neste tipo de previsões (mapeamento do recurso solar) é considerado que existe uma relação linear entre o índice de nebulosidade e a transmissibilidade da atmosfera medida pelos satélites. Os dados de satélite, com a sua ampla cobertura, são uma fonte adequada para estes horizontes. Dependendo do tratamento sobre a interação da irradiação solar e dos modelos atmosféricos de satélite podem ser classificados em duas abordagens: abordagem física e abordagem estatística.

A **abordagem estatística** é constituída por dois tipos de modelos: os empíricos e os semi-empíricos. Estes modelos têm a premissa, a correlação pseudo-linear, entre a transmitância atmosférica e as medições realizadas pelos satélites. Estas correlações foram utilizadas para criar as relações de regressão entre o que é simultaneamente observado pelos satélites e pelos instrumentos das estações terrestres (piranómetros). Vários autores têm sugerido soluções para o cálculo das variáveis GHI e DNI.

- **Modelo Hay & Hanson** (Hay & Hanson, 1978);
- **Modelo JPT/Tarpley** (Justus, Paris, & Tarpley, 1986; Tarpley, 1979);
- **Modelo Heliosat** (Cano et al., 1986);
- **Modelo Operacional Perez** (Perez & Ineichen, 1992).

A abordagem estatística é menos dispendiosa do que a física, no entanto, exige registo de estações terrestres e sofre a perda de generalidade. A abordagem semi-empírica Heliosat para prever a irradiância solar baseada em imagens de satélite (Meteosat) foi utilizada por (Vázquez, Izquierdo, Santos, Prado, & Esteves, 2007a) na construção do *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*. Esta abordagem será igualmente explorada na página 65.

Na **abordagem física**, os modelos físicos baseiam-se nas interações da radiação solar com os componentes atmosféricos participantes (CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , O_3 , etc.) e aerossóis. Estas interações são estudadas através dos modelos de transferência radiativa (RTM), assim os modelos físicos de satélites podem ser desenvolvidos através da integração dos modelos de céu limpo com os modelos de transferência radiativos, adicionando assim, informações das condições atmosféricas atuais aos modelos de céu limpo. Estes modelos podem ser classificados como de banda larga ou espectral, dependendo de, se os cálculos de transferência radiativa envolvem, um único cálculo de banda larga, ou, vários cálculos, em diferentes bandas de comprimento de onda.

- **Modelo SASRAB** (Sengupta et al., 2015);
- **Modelo GDM** (Gautier, Diak, & Masse, 1980);
- **Modelo MDV** (Marullo, Dalu, & Viola, 1987);
- **Modelo Möser & Raschke** (Möser & Raschke, 1983);
- **Modelo DDK** (Dedieu, Deschamps, & Kerr, 1987);
- **Modelo DSGD** (Darnell, Staylor, Gupta, & Denn, 1988);
- **Modelo Pinker & Laszlo** (Pinker & Laszlo, 1992).

A abordagem física é computacionalmente melhor do que a estatística, uma vez que permite adicionar canais para novos satélites (como o MSG), não necessita dos dados terrestres, visto utilizar dados de modelos de transferência radiativa. No entanto, a utilização de RTM exige que as medições sejam precisas e abrangentes, à morfologia da atmosfera, assim como a necessidade de uma calibração cuidada dos dados de satélite.

ÁREA DOS MODELOS FÍSICOS

Atualmente, as previsões de base físicas utilizam maioritariamente abordagens NWP (previsão numérica do tempo) e observações das nuvens quer seja por satélite (geostacionários) ou estações terrestres (Total Sky Imagers) (Diagne et al., 2013; Espinar, Aznarte, Girard, Mbairadjim Moussa, & Kariniotakis, 2010; Inman, Pedro, & Coimbra, 2013).

PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO (NWP)

Os modelos NWP são frequentemente operados pelos serviços meteorológicos para prever o estado da atmosfera, durante vários dias, à frente. A partir das condições iniciais que são derivados das observações em todo o mundo, o desenvolvimento temporal do estado da atmosfera é modelado pelas equações diferenciais que descrevem as leis físicas que governam a atmosfera. Esta abordagem física é fundamental para qualquer previsão superior à escala intra-horária. Como sabemos, na atmosfera existem muitos processos físicos, em escalas espaciais, muito menores do que o tamanho da grelha, como por exemplo, a condensação, a convecção, a turbulência, e a dispersão/absorção de radiação, então é necessário modelar os efeitos destes processos através de parametrizações. Estes modelos podem ser de escala global, resolução espacial grosseira, na faixa de 16 km a 50 km, e a resolução temporal de saída dos modelos é de 1 hora, 3 horas, 6 horas ou, limitada por requisitos de armazenamento, ou escala local/regional onde apresentam uma

resolução espacial mais fina, na faixa de 3 km para 20 km, e fornece previsões de hora em hora, embora escalas temporais superiores sejam viáveis. A resolução espacial mais elevada permite uma modelação explícita dos fenómenos atmosféricos de pequena escala.

MODELOS GLOBAIS

Os modelos globais apresentam uma resolução temporal e espacial grosseira (escala mundial, um hemisfério) e não permitem um mapeamento detalhado das características de pequena escala. Atualmente, estes modelos apresentam uma resolução na gama dos 16 km a 50 km e têm como objetivo principal identificar o comportamento geral da atmosfera sobre uma determinada zona. Permitem assim, identificar fenómenos meteorológicos de larga escala. Na tabela 3.3 são apresentados alguns exemplos de NWP globais.

Tabela 3.3 – Modelos de previsão numérica globais.

Designação	Desenvolvido por:
<i>GFS – Global Forecast System</i>	NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration
<i>GEM – Global Environment Multiscale Model</i>	MSC- Meteorological Service of Canada
<i>UM – Unified Model</i>	UK Met Office
<i>IFS – Integration Forecast System</i>	European Center for Medium Range Weather Forecasting

Para os modelos NWP globais a informação de entrada é obtida a partir de uma rede mundial de estações meteorológicas de observação e de medição. As variáveis de entrada são os campos tridimensionais de vento, a temperatura, e a humidade e a pressão de superfície do campo bidimensional. Como limite lateral utilizam as variáveis de cobertura de neve e a temperatura da superfície do mar.

MODELOS REGIONAIS/LOCAIS

Os modelos de NWP locais apresentam uma resolução horizontal que poderá ser inferior a 1 km permitindo analisar o comportamento da atmosfera sobre uma região específica, detetando fenómenos meteorológicos de pequena escala. Na tabela 3.4 são apresentados alguns exemplos desses modelos.

Tabela 3.4 – Modelos de previsão numérica locais.

Designação	Desenvolvido por:
<i>MM5 – Fifth Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model MM5</i>	Penn State University (PSU)/National Center for Atmospheric Research (NCAR)
<i>WRF – Weather Research and Forecasting Model</i>	NCAR, NCEP, FSL, AFWA, University of Oklahoma, FAA
<i>ARPS – Advanced Regional and Forecasting Model</i>	University of Oklahoma
<i>HIRLAM - High Resolution Limited Area Model</i>	European Meteorological Institutes

Os modelos regionais utilizam as condições iniciais como também as condições de limite lateral dos modelos globais e permitem igualmente a integração de medições meteorológicas locais. Uma vez que estes modelos permitem estudar uma determinada zona geográfica, com maior resolução espacial do que os modelos NWP globais, são mais utilizados, no âmbito da previsão de radiação solar e de potencial eólico.

LIMITAÇÕES

A principal limitação das previsões NWP é a resolução grosseira, mesmo numa resolução $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (NAM) é insuficiente para resolver a maioria das nuvens. Apenas uma cobertura média de nuvem pode ser prevista

para um determinado ponto. Para os modelos globais (GFS e ECMWF) a resolução é ainda menos detalhada. No entanto, mesmo que a resolução fosse mais fina, os intervalos temporais de saída não iriam permitir a avaliação do tempo dependente da variabilidade da cobertura das nuvens, importante na previsão das taxas de *ramp* e das faixas de variabilidade para os parques de energia solar (Diagne et al., 2013). Apesar dos modelos NWP apresentarem passos de execução na ordem de minutos, o modelo de transferência radiativa (RTM) é executado com menos frequência, pelo que a saída é apenas horária (NAM) ou a cada 3h (GFS e ECMWF). As escalas de tempo, com saídas características inferiores a uma hora, ainda estão por resolver.

ÁREA DOS MODELOS ESTATÍSTICOS

A área dos modelos estatísticos de previsão de radiação solar assenta na análise dos dados históricos da irradiação solar global, em diferentes escalas de tempo (Diagne et al., 2013; Espinar et al., 2010; Inman et al., 2013). Esta área pode ser dividida em duas categorias:

- Modelos lineares ou modelos de séries de tempo que utilizam uma abordagem estatística estacionária e não estacionária.
- Modelos não lineares que utilizam abordagens de aprendizagem, onde assumem que os padrões nos conjuntos de dados históricos são repetidos no futuro. Estes modelos podem ser agrupados em três diferentes conjuntos de métodos:
 - Métodos que estimam a irradiância solar (em diferentes escalas de tempo) com base em alguns parâmetros meteorológicos. Estes métodos utilizam, como parâmetros de entrada as variáveis meteorológicas, como a temperatura do ar, a humidade relativa, a velocidade do vento, a direção do vento, a nebulosidade, a insolação, o índice de claridade, a pressão e as coordenadas geográficas como a latitude. Dada a quantidade de parâmetros passíveis de serem utilizados é necessário estabelecer uma relação entre as entradas e as saídas dos modelos, assim existem algumas técnicas que podem ajudar, como é o caso da MLP, da RBF e da lógica Fuzzy.
 - Métodos que estimam a irradiância solar (em diferentes escalas de tempo) com base em dados observados no passado. O problema neste processo reside em estabelecer uma relação entre os dados de entrada (registos meteorológicos) de forma a ser possível obter os dados de saída, assim existem modelos de séries temporais que ajudam como é o caso das redes neurais artificiais (RNA), das redes *Wavelet* e das redes *Wavelet-Fuzzy*.
 - Métodos que estimam a irradiância solar (em diferentes escalas de tempo) com base em parâmetros meteorológicos e dados observados no passado. Nesta abordagem são utilizados os modelos de arquitetura-RNA e ANFIS.

Para qualquer modelo estatístico, a seleção e disponibilidade das variáveis de entrada apropriadas, bem como um pré-processamento otimizado destes dados é de importância crítica para o bom desempenho da previsão. Outro fator importante é a seleção da configuração do modelo a utilizar.

PRÉ - PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA

O pré-processamento dos dados de entrada pode contribuir consideravelmente para melhorar a precisão das previsões, e existem diversas abordagens. Os modelos de previsão necessitam que os dados de entrada sejam livres de tendência e de sazonalidade, certificando a série de homoscedástico (variância constante). Assim, existem diversas abordagens a utilizar caso as séries sejam não-estacionárias de uma forma apropriada (Diagne et al., 2013; Espinar et al., 2010; Inman et al., 2013).

A insolação é a quantidade de radiação solar incidente por unidade de superfície horizontal durante um período de tempo específico para uma determinada localidade. Depende fortemente do ângulo de zênite solar. Para os modelos estatísticos, pode ser favorável para tratar as influências da geometria solar determinística e a extinção atmosférica não-determinística separadamente. Para o efeito, foram introduzidas nas medidas de transmissividade que são favoráveis aos modelos estatísticos:

○ *Índice de claridade (K_t)*

O índice de claridade é definido como a proporção de irradiância ao nível do solo entre a irradiância incidente no topo da atmosfera (I_0) e a irradiância no plano horizontal (I_h) (equação 11).

Equação 11 – Índice de claridade.

$$K_t = \frac{I_h}{I_0}$$

Este índice descreve o efeito provocado pelas nuvens e constituintes atmosféricos na irradiância no topo da atmosfera. Esta abordagem reduz fortemente os padrões sazonais e diários, considerando a influência do ângulo zenital, que é modelado por I_0 . O índice de claridade é amplamente aplicado, para diminuir a tendência determinista, em series temporais de irradiância. No entanto, o índice de claridade contabiliza apenas tendências geométricas causadas por efeitos sobre a posição solar. Como a extinção atmosférica depende do comprimento do trajeto da radiação através da atmosfera, que é também regulada pela geometria solar.

○ *Índice de céu limpo (K^*)*

O índice de céu limpo diminui com o aumento do ângulo zenital solar. Para dar conta dessa influência foi introduzido o índice de céu limpo (K^*). Este índice é definido como a relação entre a irradiância ao nível do solo (I_0) e a irradiância de um modelo definido de céu limpo (I_{clear}) (equação 12).

Equação 12 – Índice de céu limpo.

$$K^* = \frac{I_0}{I_{clear}}$$

Para o cálculo do índice de céu limpo, é necessário ter um modelo de céu limpo e informações dos parâmetros atmosféricos de entrada. Os modelos de céu limpo diferem dos modelos empíricos com cálculos baseados em transferência radiativa. Todos os modelos necessitam de informações sobre o estado da atmosfera como entrada nos modelos de previsão.

MODELOS LINEARES OU MODELOS DE SÉRIES TEMPORAIS

Os modelos lineares ou de séries temporais que utilizam uma abordagem estatística, onde a relação entre as variáveis de entrada do modelo estatístico e a variável de saída são derivados a partir de uma análise estatística, têm sido utilizados com sucesso na previsão de séries de tempo para várias décadas. As séries temporais que descrevem as mudanças dos fenômenos físicos com o tempo podem ser classificadas em duas categorias principais: estacionárias e não estacionárias (Diagne et al., 2013; Espinar et al., 2010; Inman et al., 2013).

MODELO DE PERSISTÊNCIA

O modelo de persistência é considerado um dos modelos de referência mais comuns na comunidade de previsão solar e eólica para curto prazo. O modelo de persistência supõe que a radiação solar global no tempo $t+1$ é melhor prevista pelo seu valor no tempo t . Este método pode ser utilizado como referência a outros métodos. A precisão das previsões de persistência diminuem fortemente com duração das previsões devido às mudanças de nebulosidade a partir do estado atual. Este método torna-se impreciso, para previsões superiores a uma hora, e deverá ser somente utilizado como base para comparação com técnicas mais avançadas.

MODELOS LINEARES ESTACIONÁRIOS

As séries temporais dizem-se estacionárias, se forem estáticas, no que diz respeito, à sua forma geral.

Seguem-se alguns modelos desta categoria:

- Auto-Regressive (AR);
- *Moving Average (MA)*;
- *Auto-Regressive Moving Average (ARMA)*;
- *Auto-Regressive Moving Average and exogenous variable (ARMAX)*.

Para obter uma série temporal estacionária ou livre de tendência existem alguns processos que o permitem, como é o caso do índice de claridade e do índice de céu limpo. Os modelos de previsão a partir de imagens de satélite que são baseados no cálculo dos vetores de deslocamento das nuvens e de outros componentes atmosféricos necessitam igualmente destes índices. Outra das funcionalidades destes índices é no cálculo da fração da irradiação difusa a partir da irradiância num plano inclinado. Existem no entanto, outras ferramentas estatísticas para remover a tendência e a sazonalidade, como por exemplo, as séries de Fourier.

MODELOS LINEARES NÃO ESTACIONÁRIOS

Na análise de uma série temporal não estacionária, o tempo deve desempenhar um papel fundamental, por exemplo, como variável independente numa função de progressão, ou como fator de normalização numa análise da evolução de um fenómeno de um estado inicial. De seguida, é apresentado dois dos métodos lineares não estacionários, mais utilizados.

- *Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA);*
- *Auto-Regressive Integrated Moving Average and exogenous variable (ARIMAX).*

MODELOS NÃO LINEARES OU AVANÇADOS

Os modelos não lineares utilizam uma abordagem de aprendizagem baseadas em técnicas de inteligência artificial (IA), não só para a previsão, mas também para uma ampla gama de aplicações, como a resolução de problemas e planeamento, sistemas *expert*, processamento de linguagem natural, visão computacional, algoritmos genéticos, redes neurais artificiais e sistemas híbridos. As técnicas de inteligência artificial têm o potencial para fazer melhores previsões, mais rápidas e mais práticas do que qualquer outro método tradicional (Diagne et al., 2013; Espinar et al., 2010; Inman et al., 2013). Existem então diversos modelos, tais como:

- Rede Neural Artificial (RNA);
- Fuzzy Logic (FL);
- Adaptive Network Based Fuzzy Inference System (ANFIS);
- Data Mining (DM);
- Wavelet neural network (WNN);
- Genetic Algorithms (GA), entre outros.

TÉCNICAS DE PÓS-PROCESSAMENTO

Para realizar a interpretação dos dados provenientes dos modelos NWP e refinar a saída, são aplicadas técnicas de pós-processamento. Estas técnicas permitem reduzir os erros de previsão sistemáticos, contar para efeitos locais (topografia), derivar parâmetros que não são fornecidos pelos modelos NWP (irradiância solar superfície não é um parâmetro de saída padrão) e combinar a saída de diferentes modelos de maneira otimizada (Diagne et al., 2013; Espinar et al., 2010; Inman et al., 2013). De entre as várias abordagens que têm sido apresentadas, são de destacar as seguidamente mencionadas.

- *Model Output Statistics (MOS);*
- *Kalman filter;*
- *Interpolação temporal;*
- *Média espacial;*
- *Abordagem física de pós-processamento;*
- *Interpretação humana da saída de um modelo NWP.*

ÁREA DOS MODELOS HÍBRIDOS

A utilização de modelos híbridos, tornou-se mais popular, pois tira proveito de modelos diferentes. A ideia básica da combinação do modelo é usar os recursos exclusivos de cada modelo para capturar diferentes padrões nos dados. Ambos os resultados, teóricos e empíricos, sugerem que a combinação de diferentes modelos pode ser uma maneira eficiente de melhorar o desempenho de previsão. Técnicas de inteligência artificial, como a lógica *Fuzzy* e as redes neurais, têm sido utilizadas para estimar a radiação global, de hora em hora, a partir das imagens de satélite. Estes modelos que combinam as redes com outras técnicas têm sido propostas, a fim de superar as deficiências das redes neurais (Diagne et al., 2013; Espinar et al., 2010; Inman et al., 2013). Podemos encontrar modelos que combinam:

- Redes Neurais Artificiais com as Redes Wavelet;
- Previsões NWP com dados históricos de irradiância;
- Interpretação humana para NWP;
- RNA e regressões, a regressão inicial ou ARIMA é estimado, e processados usando uma rede neural;
- Combinação de duas fases separadas de previsão.

TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PREVISÃO SOLAR

A escolha de um local de implantação de uma unidade de produção de energia, quer solar quer eólica, implica a realização de comparações entre locais alternativos e de previsão de energia produzida. No caso da energia solar, a seleção do local de implementação envolve o estudo de dados históricos do recurso solar, e porque as mudanças nos padrões climáticos ocorrem a cada ano, quantos mais anos de dados melhor para a determinação de um conjunto representativo de dados anuais. Assim, surgiu o ano meteorológico típico (TMY), no qual dos dados do TMY são utilizados para comparar o recurso solar relativo dos locais de estudo e estimar o desempenho anual provável da central de energia solar. Os dados anuais são fundamentais para a avaliação da variabilidade, anual que o local de estudo sofre, ao longo de um ano. Na ausência de dados de campo, de longo prazo, o desenvolvimento de dados TMY, para grandes regiões, requer o uso de modelos que se baseiam principalmente em imagens de satélite. Em termos regionais, a identificação das principais áreas de recursos solares é simples através do uso de estações meteorológicas locais. Após o estudo, seleção e implementação das centrais de energia solar, é necessário realizar um teste de aceitação. Este teste envolve a realização de uma análise do desempenho de alguns dias, posteriormente extrapolados, para um panorama anual da central. Existem diversas abordagens (modelos) a considerar, para a obtenção dos dados precisos dos recursos energéticos, fundamentais na manutenção de uma planta energética eficiente. A previsão dos recursos é cada vez mais importante para o controlo das redes elétricas mundiais. Uma previsão precisa pode aumentar os lucros das centrais de energia renovável através, da otimização do despacho de energia, nos períodos de maior valor.

Para avaliar os modelos utilizados, no cálculo das previsões de irradiação solar, são utilizadas principalmente duas normas, a primeira é a *Root Mean Square Error - RMSE* e a segunda é a *Mean Bias Error – MBE* ou *bias*, que estão apresentadas na equação 13 e equação 14.

Equação 13 – Root Mean Square error (RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x_{pred,i} - x_{obs,i})^2}$$

Equação 14 – Mean Bias Error (bias).

$$MBE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (x_{pred,i} - x_{obs,i})$$

A RMSE, expressão apresentada na equação 13, é a raiz quadrada da média do quadrado da diferença entre os valores da radiação solar calculados (previsão) e os observados. A MBE representa o erro médio da tendência entre os valores calculados e os observados. Onde $x_{pred,i}$ e $x_{obs,i}$ representam os pares de valores calculados através da previsão e os pares de valores observados, respetivamente e, n é o número de pares de dados avaliados (Diagne et al., 2013; Espinar et al., 2010; Inman et al., 2013).

3.3 QUANTIFICAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO SOLAR NA REDE DE EMAS DA ILHA DA MADEIRA

3.3.1 CLIMA DA ILHA DA MADEIRA

O clima da ilha da Madeira é condicionado por diversos fatores que justificam a variedade de microclimas existente: a localização geográfica, a latitude, a sua localização oceânica, a configuração e orientação do relevo, a altitude, os centros anticiclónicos que a afetam desde os Continentais, do Noroeste de África e da Europa Ocidental até o anticiclone dos Açores, bem como os sistemas frontais associados aos centros de baixas pressões da frente polar (figura 3.22).

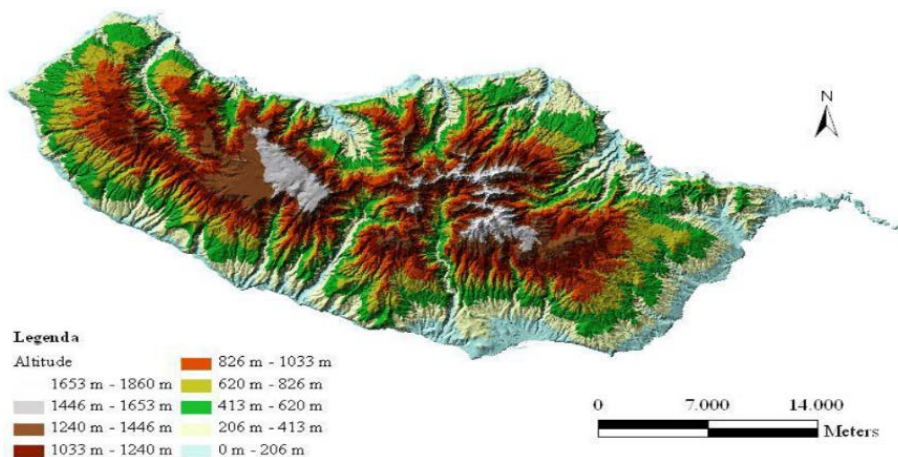


Figura 3.22 – Orografia da ilha da Madeira.

Fonte: (Sepúlveda, 2011).

A ilha da Madeira encontra-se orientada perpendicularmente à direção predominante do vento o que dá origem, a que a temperatura e a quantidade de precipitação, à mesma cota, mas em encostas com diferentes exposições aos ventos, dominantes de Nordeste, possam ser bastante diferentes. A nebulosidade, em terra, é maior do que sobre o mar, na região em que está situada, devido à formação das nuvens e nevoeiros

orográficos, figura 3.23. O ar húmido, transportado pelo vento, ao encontrar a ilha (barreira montanhosa de orientação Este-Oeste) é forçado a subir, arrefecendo adiabaticamente e condensando em pequenas partículas que se encontram em suspensão na atmosfera (Figueira, 2009; S. Prada et al., 2003).



Figura 3.23 – Explicação do efeito de formação das nuvens e nevoeiros orográficos na ilha da Madeira.
Fonte: (S. Prada et al., 2003).

Os nevoeiros são assim, maioritariamente orográficos, formam-se a barlavento da elevação, com tendência a dissiparem-se, a sotavento, devido ao aumento de pressão e consequente aquecimento, fenómeno designado de *Efeito de Föhn*. Em termos de ocorrência, a Bica da Cana (Paul da Serra) atinge 235 dias/ano e no Pico do Areeiro (Maciço Central), 229 dias/ano. Em relação, à variação em altitude, a cobertura nebulosa, fixa-se entre os 600 – 800 m e os 1600 m no inverno, descendo mais abaixo, no verão (S. Prada et al., 2003).

Os contrastes térmicos que se verificam diariamente, entre a terra e o mar, são responsáveis pelo desenvolvimento das brisas – “terral” e “embate” na encosta meridional da ilha e que, por sua vez, associadas ao relevo, estão na origem do conhecido “efeito capacete”. As brisas de mar e de terra são sistemas de circulação do ar de escala regional, de carácter periódico, induzido por contrastes térmicos horizontais, que ocorrem entre a atmosfera marítima e a terrestre adjacente. De dia, o desigual aquecimento do ar de superfície provoca a diminuição da pressão na atmosfera terrestre para níveis inferiores aos da atmosfera marítima, o que faz ativar a circulação da brisa do mar. De noite, a diferença de pressão desaparece e eventualmente inverte-se, desencadeando a circulação de brisa de terra (Ribeiro, 1985).

3.3.2 REDE DE EMAS DO LREC

No ano de 2000, foi iniciado o projeto PAUER, que visava um conjunto de intervenções técnicas com vista à promoção e utilização de energias renováveis no arquipélago da Madeira. Este projeto baseou-se em três vertentes: na prospeção e avaliação de recursos endógenos, na criação de uma base de dados específica para projetos multidisciplinares e instalação de sistemas híbridos renováveis, em locais isolados (Esteves, 2007).

No âmbito da criação da base de dados, o Departamento de Hidráulica e Energias Renováveis (DHER) ficou responsável pela instalação e processamento dos dados. A rede de EMAs LREC entrou em funcionamento a partir de 2005, com o objetivo de reunir dados fiáveis para a avaliação de recursos naturais (hídrico, eólico e solar). É constituída por dez estações ativas, distribuídas por diversos locais da ilha da Madeira, e uma inativa,

localizada na Deserta Grande. Provavelmente a estação, atualmente inativa, nas ilhas Desertas será reativada até ao final deste ano.

A rede de EMAs LREC possui um funcionamento automático, onde cada EMA é equipada por um conjunto de sensores ligados a uma unidade de aquisição de dados, *dataTaker*, que posteriormente envia os registos para o sistema de aquisição centralizado, localizado no edifício do LREC, em São Martinho. Este sistema está programado para proceder à recolha diária remota dos dados, quer através da rede pública GSM, quer por via da rede de comunicações privativa do LREC. Os piranómetros realizam medições, de 10 em 10 minutos, no entanto, só é contabilizado, o acumulado da ISG horizontal incidente, de uma hora. À exceção da EMA do LREC que envia os registos de hora em hora, as restantes só transmitem de 24 em 24 horas. Assim, num dia são armazenados 24 dados, que em termos anuais correspondem a 8760 (24×365) dados. Caso ocorra uma falha nas comunicações, as EMAs estão equipadas com um sistema de memória, não volátil, que permite manter os dados por vários dias, até que as comunicações sejam retomadas. No entanto, caso esta falha, impossibilite o correto funcionamento e, seja necessário inserir novamente o programa no *dataTaker*, quer remotamente quer presencialmente, os dados são perdidos. Após os dados serem rececionados, são verificados e armazenados numa base de dados. Estes dados são disponibilizados na intranet da rede de EMAs LREC, depois de armazenados, na base de dados.

Na figura 3.24, encontram-se identificadas as EMAs ativas, na ilha da Madeira, geridas pelo LREC.



Figura 3.24 – Localização das estações da rede de EMAs LREC no mapa da ilha da Madeira.

Como já foi referido, a implementação da rede de EMAs LREC teve como objetivo principal reunir, uma grande variedade de dados meteorológicos da ilha da Madeira, numa única base de dados. Assim, esta rede apresenta uma distribuição geográfica, conforme é descrito na tabela 3.5, que teve em conta as estações já existentes do antigo Instituto de Meteorologia, agora parte integrante do IPMA através da Delegação Regional.

Tabela 3.5 – Descrição da localização das estações da rede de EMAs LREC.

EMA	Concelho	Altitude [m]	Coordenadas UTM		Início dd-mm-aa	Fim Ano
			X	Y		
Bica da Cana	Ponta do Sol	1600	307826.63	3625777.46	13-09-05	-
Deserta Grande	Santa Cruz	10	357916.00	3599878.00	25-10-05	2011
Encumeada	São Vicente	1017	311241.02	3625463.11	23-06-05	-
LREC	Funchal	250	318245.63	3613998.51	01-06-05	-
Machico	Machico	170	333732.00	3621863.00	20-12-08	-
P. Eco. Funchal	Funchal	1300	322346.44	3619700.05	01-09-06	-
Pico das Pedras	Santana	920	322626.00	3627926.00	07-04-10	-
Pico Verde	Calheta	980	296238.43	3627388.33	01-07-05	-
Porto Moniz	Porto Moniz	675	295829.95	3635844.90	09-07-05	-
Prazeres	Calheta	648	294230.00	3626108.00	20-05-11	-
Trapiche	Funchal	590	317762.00	3616934.00	13-08-11	-

De seguida seguem-se representadas algumas figuras das instalações das EMAs (da figura 3.25 à figura 3.34).

EMA DA BICA DA CANA



Figura 3.25 – EMA da Bica da Cana – Piranómetro Tipo SC.

EMA DO PICO VERDE (CALHETA)



Figura 3.26 – EMA do Pico Verde – Piranómetro Tipo SC.

EMA DA ENCUMEADA



Figura 3.27 – EMA da Encumeada – Piranómetro Tipo SC e C.

EMA DO LREC





Figura 3.28 – EMA do LREC – Piranómetros Tipo SC, A e C.

EMA DE MACHICO



Figura 3.29 – EMA de Machico – Piranómetros Tipo SC.

EMA DO PARQUE ECOLÓGICO DO FUNCHAL



Figura 3.30 – EMA do Parque Ecológico do Funchal – Piranómetro tipo SC.

EMA DO PORTO MONIZ



Figura 3.31 – EMA do Porto Moniz – Piranómetro tipo SC.

EMA DOS PRAZERES (CASA FLORESTAL)



Figura 3.32 – EMA da Casa Florestal dos Prazeres – Piranómetro tipo SC.

EMA DO PICO DAS PEDRAS



Figura 3.33 – EMA do Viveiro Florestal do Pico das Pedras – Santana – Piranómetros tipo SC.

EMA DO TRAPICHE



Figura 3.34 – EMA do Trapiche – Piranómetro tipo SC.

Os sensores que equipam as estações são responsáveis por medir os seguintes parâmetros meteorológicos: temperatura do ar, radiação solar, precipitação, direção e velocidade do vento, humidade relativa do ar, pressão atmosférica e temperatura da relva (solo). Na tabela 3.6 é apresentado as principais características dos sensores que equipam as EMAs e, a cada parâmetro está associado um número referente à legenda da figura 3.35.

Tabela 3.6 – Caracterização de uma Estação Meteorológica Automática.

Parâmetro	Unidade	Equipamento	Marca e Modelo	Nº na fig.
Temperatura do ar	°C	Termo higrómetro com proteção anti irradiação e intempéries	THIES – 1.1002.54.000	1
Humidade Relativa do ar	%			
Precipitação	mm	Udógrafo	Pronamic – 300023-20	2
Radiação Solar Global	KJ/m ²	Piranómetro	Kipp&Zonen – SP Lite	3
Velocidade do vento	m/s	Anemómetro	THIES – 4.3515.30.000	4
Direção do Vento	° (Grau)	Catavento		5
Pressão atmosférica	hPa	Barómetro	RM YOUNG - 61202	6
Temperatura do Solo	°C	Sensor de Temperatura	SKYE – SKTS 300	7



Figura 3.35 – Disposição dos sensores que medem os parâmetros meteorológicos das EMAs.

3.3.3 EQUIPAMENTOS TÉCNICOS DA REDE DE EMAS LREC

Os sensores de radiação solar que englobam as EMAs da rede LREC compreendem três tipos de modelos:

- Sensor de Radiação Solar Difusa com anel de sombreamento (RS tipo A – Secondary Standard);
- Sensor de Radiação Solar (RS tipo C – Second Class);
- Sensor de Radiação Solar (RS tipo SC – Sem Classificação ISO 9060).

SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR (RS TIPO A) – PIRANÓMETRO CM11 COM ANEL DE SOMBREAMENTO

O piranómetro CM11, associado a um anel de sombreamento CM121B, permite medir somente a componente difusa da radiação solar. O piranómetro CM11 está em conformidade com as especificações de alta qualidade, que é a melhor de três classes, segundo a WMO, e posteriormente, revista e adotada pela ISO com o número 9060. Este piranómetro é do tipo detetor térmico, responde à energia total absorvida e teoricamente é não-seletivo, para a distribuição espectral. Isto implica que o detetor térmico seja sensível à radiação nos comprimentos de onda do infravermelho (Kipp & Zonen B.V., 2016).

Segundo a norma ISO 9060 e igualmente aceite pela WMO, este sensor pertence à “Secondary Standard” dos piranómetros. As suas principais características são apresentadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Características dos sensores de radiação do tipo A da rede de EMAs.

Adaptado: (Kipp & Zonen B.V., 2016).

Tipo de Sensor	Marca	Modelo	Características	Tipo de Detetor
Sensor de radiação difusa com anel de sombreamento (RS tipo A)	Kipp & Zonen	Piranómetro CM11 com modelo de sombreamento CM 121B	Faixa do espectro: 310 – 2800 nm (50% pontos) 340 – 2200 nm (95% pontos)	Termopilha
			Seletividade espectral: $\pm 2\%$ (0.35 μm a 1.5 μm)	
			Sensibilidade: 4 – 6 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	
			Impedância: 700 – 1500 Ω	
			Tempo de Resposta: < 24 s (99% respostas) < 15 s (95% respostas)	
			Não-linearidade: < 0.6 % (< 1000 W/m^2)	
			Dependência da sensibilidade da temperatura: < 1 % (–10 °C a + 40°C)	
			Erro direcional: < 10 W/m^2 (feixe de 1000 W/m^2)	
			Erro Tilt: < 0.25% (feixe de 1000 W/m^2)	
			Zero-offset: Offset – A: < 7 W/m^2 Offset – B: < 2 W/m^2	
			Irradiância: 0 – 1400 W/m^2 (Máx: 4000 W/m^2)	
			Dependência com a Temperatura $\pm 1\%$ (–10°C a + 40°C)	
			Instabilidade: < 0,5% de mudança de sensibilidade por ano	
			Classe: “Secondary standard”	

SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR (RS TIPO C) – PIRANÓMETRO CM3

Este piranómetro consiste num sensor do tipo termoeletrico de alta qualidade, revestido por uma tinta absorvente preta e por uma cúpula (difusor/esfera integradora). A radiação solar, ao incidir na cúpula é uniformemente distribuída pela área sensível e convertida em calor. A diferença de temperatura resultante é transformada numa variação da tensão. A resposta espectral plana permite que o CM3 possa ser utilizado sob copas de plantas ou lâmpadas, quando o céu está nublado, e para medições de radiação refletida. Apresenta uma resistência de saída nominal de 200 Ω e a sensibilidade do detetor termoeletrico varia consoante a temperatura. Esta variação é minimizada, pois a calibração é realizada a 20°C e rastreáveis para a WRR (Kipp & Zonen B.V., 2016).

Segundo a norma ISO 9060 e igualmente aceite pela WMO, este sensor pertence à “Second Class” dos piranómetros. As suas principais características são apresentadas na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Características dos sensores de radiação do tipo C da rede de EMAs.

Adaptado: (Kipp & Zonen B.V., 2016).

Tipo de Sensor	Marca	Modelo	Características	Tipo de Detetor
Sensor de Radiação Solar (RS tipo C)	Kipp & Zonen	Piranómetro de Silício CM 3	Faixa do espetro: 305 – 2800 nm (50% pontos)	Termopilha
			Seletividade espectral: $\pm 5\%$ (0,35 μm a 1,5 μm)	
			Sensibilidade: 10 – 35 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	
			Impedância: 60 – 200 Ωm	
			Tempo de Resposta: < 18s (95% respostas)	
			Não-linearidade: $\pm 2,5\%$ (< 1000 W/m^2)	
			Dependência da sensibilidade da temperatura: < 6% (–10 °C a + 40 °C)	
			Erro direcional: < $\pm 25 \text{ W}/\text{m}^2$ (feixe de 1000 W/m^2)	
			Erro Tilt: < $\pm 2\%$ (feixe de 1000 W/m^2)	
			Zero - offset: Offset - A: < 15 W/m^2 Offset - B: < 4 W/m^2	
			Irradiância: 0 – 1400 W/m^2 (Máx: 4000 W/m^2)	
			Dependência com a Temperatura $\pm 6\%$ (–10 °C a + 40 °C)	
			Instabilidade: < 1% de mudança de sensibilidade por ano	
			Classe: "Second Class"	

SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR (RS - TIPO SC) – PIRANÓMETRO SP LITE

Este sensor de radiação do tipo sem classificação é da marca Kipp & Zonen e do modelo SP LITE. É um sensor económico que utiliza um detetor do tipo fotodiodo de silício, que cria uma tensão de saída proporcional à radiação incidente. Devido ao design do difusor, a sensibilidade deste sensor é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência da radiação, permitindo medições precisas e consistentes. Pelo facto de este detetor ser de silício não cumpre as especificidades da norma ISO 9060 que classifica os instrumentos de medição, da radiação solar global (Kipp & Zonen B.V., 2016). As suas principais características são apresentadas na tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Características dos Sensores de Radiação do tipo SC da rede de EMAs.

Adaptado: (Kipp & Zonen B.V., 2016).

Tipo de Sensor	Marca	Modelo	Características	Tipo de Detetor
Sensor de Radiação Solar (RS tipo SC)	Kipp & Zonen	Piranómetro de Silício SP LITE	Faixa do espetro: 400 – 1100 nm	Silício Foto diodo (BPW 34)
			Sensibilidade: 60 a 100 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$	
			Impedância: < 50 Ωm	
			Tempo de Resposta: < 1s (95% respostas)	
			Não-linearidade: < 1% (< 1000 W/m^2)	
			Dependência da sensibilidade da temperatura: < 0,15% (–10 °C a + 40 °C)	
			Erro direcional: < $\pm 25 \text{ W}/\text{m}^2$ (feixe de 1000 W/m^2)	
			Erro Tilt: Sem erro	
			Irradiância: 0 – 1400 W/m^2 (Máx: 2000 W/m^2)	
			Dependência com a Temperatura $\pm 6\%$ (–10 °C a + 40 °C)	
			Instabilidade: < $\pm 2\%$ de mudança de sensibilidade por ano	

3.3.4 REDE DE EMAS DO IPMA

Os dados de radiação solar da rede de EMAs IPMA foram gentilmente cedidos ao LREC, por parte do Dr. Victor Prior, Diretor da Delegação Regional do IPMA. Uma vez que a rede de EMAs LREC possui um intervalo de funcionamento, desde 2005 até agosto de 2015, os dados requeridos (solicitados) ao IPMA referiam-se ao mesmo intervalo de tempo. A disponibilização destes dados teve como objetivo principal permitir uma melhor análise do panorama regional da radiação solar.

A rede de EMAs IPMA entrou em funcionamento a partir de 2002, com o objetivo de, tal como a nível nacional, concentrar os seus esforços na investigação em domínios da meteorologia, meteorologia aeronáutica, do clima, da sismologia e do geomagnetismo, para que os projetos desenvolvidos revertam em aplicações diretas, com aplicação na atividade operacional, na procura de uma melhoria progressiva da informação disponibilizada aos seus utilizadores, quer a oferta revista um carácter comercial, quer preste um serviço público e em particular, neste caso, com a preocupação orientada para a salvaguarda de pessoas e bens.

A rede de EMAs IPMA é constituída por 18 estações ativas, 17 delas, distribuídas por diversos locais da ilha da Madeira e uma localizada na ilha do Porto Santo, no aeroporto. Na figura 3.36 encontram-se identificadas as EMAs ativas na ilha da Madeira e na tabela 3.10 encontram-se discriminados alguns dados sobre a sua localização.

Os dados descritos na tabela 3.10 referem-se às dezoito estações constituintes da rede de EMAs IPMA, onde os parâmetros caracterizados são: análise de vento (com vento - cv ou sem vento - sv), localização geográfica, altitude, data de instalação e data do primeiro mês de envio de dados.



Figura 3.36 - Localização das estações da rede de EMAs IPMA no mapa da ilha da Madeira.

Tabela 3.10 – Descrição da localização das estações da rede EMAs IPMA.

Número	Nome_estação	Tipo	Lat_G	Lat_M	Lat_S	Lon_G	Lon_M	Lon_S	Altitude	Início	1º mês de envio de dados
0522	Funchal / Observatório	cv	32	38	50.97	16	53	32.82	58	26-abr-95	01-set-02
0524	Porto Santo / Aeroporto	cv	33	4	33.00	16	20	53.00	78	26-abr-95	01-out-03
0971	Funchal / Lido	cv	32	38	11.76	16	56	8.25	25	11-fev-02	01-out-02
0960	Ponta de S. Jorge	cv	32	50	4.11	16	54	23.01	258	11-fev-02	01-set-02
0973	Chão do Areeiro	cv	32	43	20.58	16	54	55.01	1590	11-fev-02	01-set-02
0986	Lugar de Baixo	cv	32	40	48.60	17	5	14.99	42	11-fev-02	01-set-02
0990	Ponta do Pargo	cv	32	48	49.78	17	15	47.51	278	11-fev-02	01-jan-07
0978	Canical / Ponta de S. Lourenço	cv	32	44	54.35	16	42	23.96	133	11-jul-09	01-jan-10
0980	Achadas da Cruz / Lombo da Terça	cv	32	49	53.45	17	12	7.50	934	11-jul-09	01-ago-10
0965	Santana	sv	32	48	29.68	16	53	11.06	409	23-ago-10	01-set-10
0967	S. Vicente	sv	32	47	48.77	17	2	33.31	110	23-ago-10	01-set-10
0970	Bica da Cana	sv	32	45	23.30	17	3	27.66	1580	23-ago-10	01-set-10
0975	Santo da Serra	cv	32	43	33.24	16	49	0.54	690	23-ago-10	01-set-10
0984	Quinta Grande	sv	32	39	45.60	17	0	29.21	458	23-ago-10	01-set-10
0956	Porto Moniz	cv	32	52	2.31	17	10	4.47	35	06-mar-14	01-abr-14
0972	Pico Alto (FUN)	cv	32	42	4.11	16	54	10.07	1112	01-ago-14	01-jan-15
0521	Santa Catarina / Aeroporto	cv	32	41	37.00	16	46	32.00	58	01-dez-14	01-dez-14

3.3.5 EQUIPAMENTOS TÉCNICOS DA REDE DE EMAs IPMA

As estações meteorológicas da rede IPMA medem os seguintes parâmetros meteorológicos: temperatura do ar, radiação solar, precipitação, direção e velocidade do vento, humidade relativa do ar, pressão atmosférica e temperatura da relva (solo), excetuando a estação do Pico do Areeiro2 (CFM) que não mede radiação solar. A disposição dos sensores que medem os diferentes parâmetros meteorológicos é próxima da utilizada na rede de EMAs LREC, visível na figura 3.35.

Os sensores de radiação solar que englobam as EMAs da rede IPMA compreendem três tipos de modelos:

- Sensor de Radiação Solar (RS tipo A - Secondary Standard);
- Sensor de Radiação Solar (RS tipo B – First Class);
- Sensor de Radiação Solar (RS tipo C – Second Class).

SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR (RS TIPO A) – PIRANÓMETRO CM11

Na rede de EMAs IPMA existem nove estações que possuem este tipo de piranómetros, são elas, as EMAs, do Observatório, do Aeroporto Santa Catarina, do Aeroporto do Porto Santo, do Areeiro, do Lugar de Baixo, da Ponta do Pargo, de São Jorge, do Lombo da Terça e a da Ponta de São Lourenço (Canical). Este sensor de radiação solar, da marca *Kipp & Zonen*, modelo CM11, é igual em algumas EMAs da rede LREC, pelo que as suas principais características já foram apresentadas na tabela 3.7 (Kipp & Zonen B.V., 2016).

SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR (RS TIPO B) – PIRANÓMETRO EP08

Na rede de EMAs IPMA existem seis estações que possuem este tipo de piranómetros, são elas, as EMAs do Lido, da Quinta Grande, do Santo da Serra, da Bica da Cana, do Pico Alto e a do Porto Moniz. Este tipo de piranómetros, da marca *Middleton* e do modelo EP08, consiste num sensor do tipo termoeletrónico de alta qualidade, revestido por uma tinta absorvente preta e por uma cúpula (difusor/esfera integradora). Dada a

sua performance é comparado favoravelmente à categoria “First Class” da ISO 9060 (HuksefluxUSA, 2008; Kipp & Zonen B.V., 2016). As suas principais características são apresentadas na tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Características dos sensores de radiação do tipo B da rede de EMAs IPMA.
Adaptado: (Middleton Solar Instruments, 2001).

Tipo de Sensor	Marca	Modelo	Características	Tipo de Detetor
Sensor de Radiação Solar (RS tipo B)	Middleton	Piranómetro de Silício Solar EP08	Tempo de Resposta (to 95%): 20,5 s	Termopilha
			Sensibilidade: 5 a 7 $\mu V/W/m^2$	
			Faixa do espetro: 300 – 3000 nm	
			Irradiância: 0 – 1400 W/m^2 Máx: 2000 W/m^2	
			Dependência com a Temperatura: $\pm 0,5\%/^{\circ}C$	
			Classificação pela ISSO 9060: “Comparado à First Classe”	

SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR (RS TIPO C) – PIRANÓMETRO SP LITE2

Na rede IPMA existem apenas duas estações que possuem este tipo de piranómetros, são elas, as EMAs de Santana e de São Vicente. Este tipo de piranómetros, da marca *Kipp & Zonen* e do modelo SP Lite2, consistem num detetor do tipo fotodiodo, que cria uma tensão de saída proporcional à radiação incidente. Trata-se de um piranómetro simples para medições de rotina da radiação solar. Devido ao design do difusor, a sensibilidade deste sensor é proporcional ao cosseno do ângulo de incidência da radiação, permitindo medições precisas e consistentes. Dada a sua performance é comparado favoravelmente à categoria “Second Class” da ISO 9060 (HuksefluxUSA, 2008; Kipp & Zonen B.V., 2016).

Tabela 3.12 - Características dos sensores de radiação do tipo C da rede de EMAs IPMA.
Adaptado: (Kipp & Zonen B.V., 2016).

Tipo de Sensor	Marca	Modelo	Características	Tipo de Detetor
Sensor de Radiação Solar (RS tipo C)	Kipp & Zonen	Piranómetro de Silício SP Lite2	Tempo de Resposta (to 95%): < 1s	Foto díodo
			Sensibilidade: 60 a 100 $\mu V/W/m^2$	
			Faixa do espetro: 400 – 1100 nm	
			Irradiância: Máx: 2000 W/m^2	
			Dependência com a Temperatura: $\pm 0,15\%/^{\circ}C$	
			Tipo de detetor: Foto - díodo (BPW 34)	
			Classificação pela ISSO 9060: “Comparado à Second Class”	

3.4 METODOLOGIA DO TRATAMENTO E ANÁLISE DOS REGISTOS DE RADIAÇÃO SOLAR DA ILHA DA MADEIRA

3.4.1 METODOLOGIA PARA OS REGISTOS DA REDE DE EMAS LREC

Passo 1: Transferir todos os registos anuais, de cada um das dez EMAs geridas pelo LREC, em formato Excel, da plataforma de intranet;

Passo 2: Análise individual de todos os ficheiros;

Passo 3: Identificação manual dos tipos de ausências de dados (lacunas) existentes nos ficheiros;

Passo 4: Selecionar um procedimento/aplicação que permita identificar todas as lacunas de forma sistemática;

Do passo anterior, resultou a identificação dos seguintes tipos de ausência de dados (anexo A.1.1) e, deste passo, o respetivo procedimento a aplicar (anexo A.1.2). Assim:

- Para os registos onde foram identificados duplicação e triplicação de registos, o procedimento a aplicar foi a eliminação do registo (s) a mais;
- Para as falhas sistemáticas na mesma hora, o procedimento a aplicar foi a identificação com ausência de registo, no novo ficheiro de registos;
- Para as falhas onde ocorre alteração da hora atribuída ao registo, ou seja, por exemplo o registo das 11h aparecer com a hora atribuída nas 12h e 1min, nesses casos, o procedimento a aplicar é a atribuição da hora correta aos registos;
- Para as falhas onde as horas atribuídas aos registos são cientificamente impossíveis, ou seja, no período noturno, apresentar valores extremamente elevados e, no período diurno nulos ou negativos, o procedimento a aplicar é a identificação, com ausência de registos, nesse período;

Passo 5: Reunir todos os registos da rede de EMAs LREC, num novo ficheiro Excel (Dados REMA-LREC.xlsm) com a totalidade das amostras, correspondentes a um ano completo, 8760 dados, com as respetivas lacunas com ausência de dados identificadas;

Passo 6: Construir uma folha de cálculo no ficheiro anterior que permita introduzir os registos mensais de uma estação, e, posteriormente calcular o total de Irradiação Solar Global Diária ($\text{kJ/m}^2\cdot\text{dia}$) e a Média Horária da Irradiação Solar Global ($\text{kJ/m}^2\cdot\text{h}$);

Passo 7: Armazenar em diferentes folhas, no ficheiro (Dados REMA-LREC.xlsm), os resultados obtidos da Variação Diária do valor médio da Irradiação Solar Global Horária e da Variação Mensal da Irradiação Solar Global Diária, para cada uma das estações estudadas;

Passo 8: Calcular a Média Mensal da Irradiação Solar Global Diária, permitindo calcular o Total Mensal e Anual da Irradiação Solar Global para todas as EMAs;

Passo 9: Armazenar todos os resultados, do passo anterior, numa nova folha de cálculo denominada “Variação da ISG ($\text{kJ/m}^2\cdot\text{dia}$)”. Calcular a Média Mensal da Irradiação Solar Global Diária do período compreendido entre primeiro mês completo de dados (a instalação da rede de estações foi iniciada no ano de 2005 e terminou no ano de 2011) até o mês de agosto do ano de 2015, para cada EMA da rede LREC. Na tabela 3.13 são apresentados o número de meses utilizado no cálculo da Média Mensal da ISGD de cada EMA da rede LREC;

Tabela 3.13 – Número de meses utilizados para o cálculo da média mensal da ISGD em cada EMA da rede LREC.

Início	01-jun-05	23-jun-05	01-jul-05	09-jul-05	13-set-05	25-out-05	01-set-06	23-ago-08	07-abr-10	20-mai-11	13-ago-11
Dados	01-jun-05	01-jul-05	01-jul-05	01-out-05	01-out-05	01-jul-07	01-set-06	01-jan-09	01-abr-10	01-jun-11	01-set-11
2005/15	LREC	Encumeada (LREC)	Pico Verde (LREC)	Porto Moniz (LREC)	Bica da Cana (LREC)	Desertas	P.E.Funchal (LREC)	Machico (LREC)	Santana (LREC)	Prazeres (LREC)	Trapiche (LREC)
jan	10	10	10	7	10	4	8	6	4	3	4
fev	10	10	10	8	9	4	8	5	5	3	3
mar	10	10	10	8	10	4	7	5	5	2	2
abr	10	10	9	8	10	4	7	4	5	2	2
mai	10	10	9	8	9	2	7	6	5	2	2
jun	11	10	9	8	9	2	7	6	5	2	1
jul	10	11	10	8	9	4	8	6	5	3	1
ago	10	9	10	8	9	4	7	6	5	3	2
set	9	9	9	7	8	4	6	5	4	2	3
out	9	8	9	8	9	4	6	5	4	2	3
nov	10	9	8	7	9	4	8	5	4	2	3
dez	10	8	7	7	9	4	9	5	4	3	4

Passo 10: Converter os resultados de joule ($\text{kJ}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$) para watt.hora ($\text{Wh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$);

Passo 11: Construir os gráficos da variação anual da Irradiação Solar Global Diária.

3.4.1 SÍNTESE DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS LREC

Relativamente aos resultados da análise dos registos da rede de EMAs LREC, estes são apresentados no Anexo A.1, conforme a seguinte ordem:

- A.1.1 – Procedimento de tratamento dos registos das EMAs LREC;
- A.1.2 – Resumo das etapas do procedimento de tratamento dos registos das EMAs LREC;
- A.1.3 – Contabilização das lacunas de dias nos registos da rede de EMAs LREC, entre o 1º mês completo de dados até agosto de 2015;
- A.1.4 – Contabilização dos meses utilizados no cálculo da variação anual da Irradiação Solar Global Diária da rede de EMAs do LREC;
- A.1.5 – Variação anual da Irradiação Solar Global Diária, das EMAs da rede LREC, entre o 1º mês completo de dados até agosto de 2015 ($\text{Wh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$);
- A.1.6 – Variação anual da Irradiação Solar Global Diária, das EMAs da rede LREC, entre o 1º mês completo de dados até agosto de 2015 ($\text{kJ}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$);
- A.1.7 – Irradiação Solar Global Anual disponível nas EMAs da rede LREC (kWh/m^2);
- A.1.8 – Gráficos da variação anual da Irradiação Solar Global Diária nas EMAs da rede LREC, por concelho ($\text{Wh}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$).

3.4.2 ANÁLISE GRÁFICA DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS LREC

A rede de EMAs LREC, como já foi referido ao longo deste trabalho, é constituída por onze estações, das quais, dez estão localizadas na ilha da Madeira, geograficamente distribuídas conforme é visível na figura 3.37.

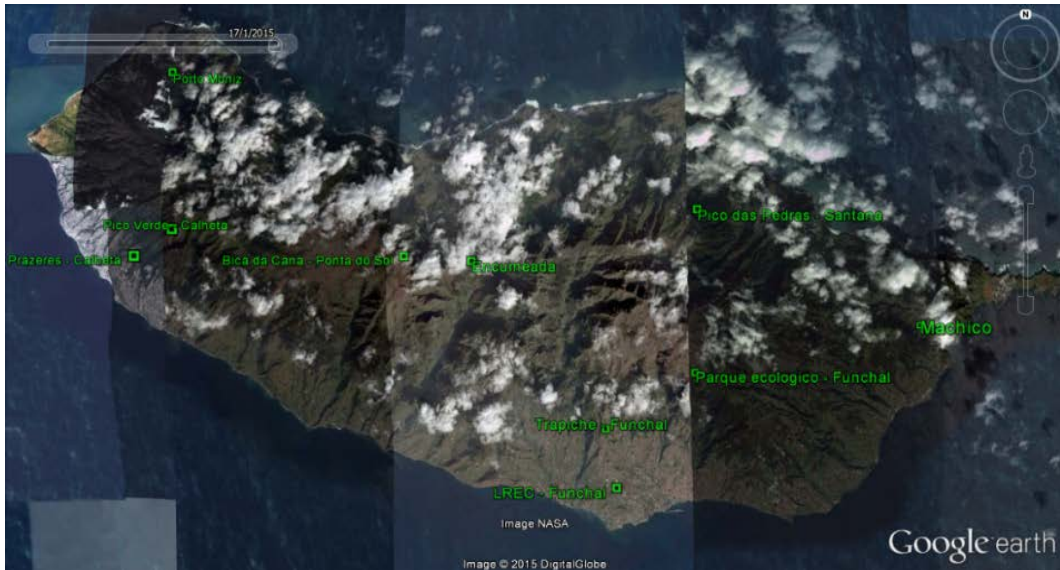


Figura 3.37 – Distribuição da rede de EMAs LREC no mapa da ilha da Madeira.

Analisando os valores apresentados no anexo A.1.8, na figura 3.38 e tendo sempre em consideração a localização geográfica da rede de EMAs LREC, figura 3.37, podemos concluir os seguintes pontos:

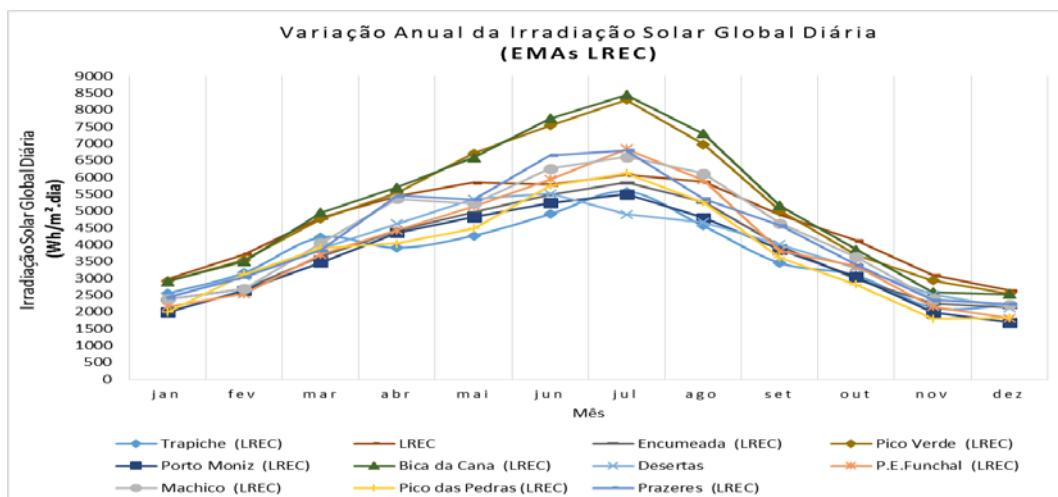


Figura 3.38 – Variação anual da ISGD, em $\text{Wh/m}^2.\text{dia}$, nas EMAs da rede LREC.

- Em termos anuais, a ISG disponível nestas EMAs, superior a 1500 kWh/m^2 , por ordem decrescente, é observado: na EMA do LREC (1687), EMA da Bica da Cana (1837), EMA do Pico Verde (1802), EMA dos Prazeres (1590), EMA do PE do Funchal (1572) e na EMA de Machico (1545);
- Em termos anuais, a ISG disponível nestas EMAs, inferior a 1500 kWh/m^2 , por ordem decrescente, é observado: na EMA da Encumeada (1389), EMA de Santana (1360), EMA das Desertas (1333), EMA do Trapiche (1333) e na EMA do Porto Moniz (1307);
- O valor mais alto da ISGD é observado, em termos médios, na EMA da Bica da Cana, no mês de Julho, com $8436 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$;
- O valor mais baixo da ISGD é observado, em termos médios, na EMA do Porto Moniz, no mês de dezembro, com $1693 \text{ Wh/m}^2.\text{dia}$.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAS DO CONCELHO DA CALHETA

O concelho da Calheta é constituído por duas EMAs: a EMA do Pico Verde e a EMA dos Prazeres. A estação dos Prazeres situa-se à cota dos 648 m e a estação do Pico Verde à cota dos 980 m. O seu enquadramento geográfico é apresentado na figura 3.39 e a variação anual da ISGD de ambas as estações na figura 3.40.

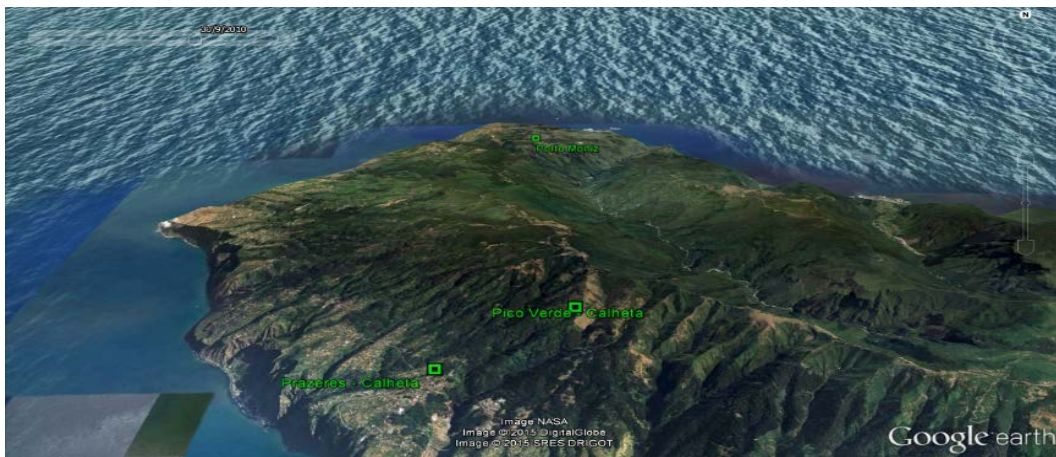


Figura 3.39 - Enquadramento das EMAs LREC do concelho da Calheta no mapa.

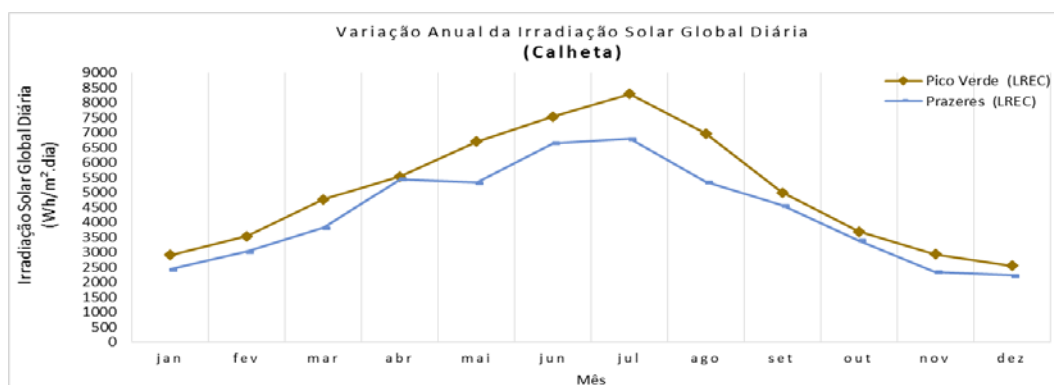


Figura 3.40 – Variação anual da ISGD, em Wh/m².dia, nas EMAs LREC do concelho da Calheta.

Analisando os valores da figura 3.40, do anexo A.1.8 e tendo em conta as características do local de implantação destas estações, figura 3.37 e figura 3.39, podemos referir alguns aspetos que nos ajudam a compreender os resultados.

A **EMA do Pico Verde** está localizada dentro da área abrangida pela Rede do Parque Natural da Madeira e, segundo a Carta de Ocupação do Solo de 2007, a utilização do solo é do tipo mato ou vegetação herbácea, dado que será seguidamente justificado. No lado oposto à EMA do Pico Verde, predomina a Floresta Laurissilva (floresta subtropical húmida) e, um dos fatores principais para a sua existência, é a passagem dos ventos alísios (nordeste) que são forçados a subir pela encosta norte, onde posteriormente o ar arrefece adiabaticamente, onde condensa, formando as nuvens e nevoeiros orográficos que originam a precipitação oculta que alimenta esta floresta, fenómeno representado na figura 3.23. No lado sul da ilha da Madeira, o crescimento deste tipo de floresta/vegetação já não é comum, visto que, o seu crescimento só é potenciado pela precipitação oculta. As nuvens e o nevoeiro, quando alcançam a linha de cumeada, (separação entre o

Norte e o Sul) invertem o seu movimento e iniciam o movimento descendente aquecendo e expandindo até dissiparem, caso não esteja a brisa marítima ativa.

Assim, as nuvens e as neblinas que atingem o lado sul, como são pobres em água (ar seco), o crescimento deste tipo de floresta/vegetação já não ocorre, pelo que, a EMA do Pico Verde é circundada por uma vegetação herbácea e/ou mato. A EMA do Pico Verde geograficamente encontra-se numa linha de fêsto - separação de águas, regionalmente conhecido como “Lombo”, amplamente exposta à radiação solar. No entanto, esta estação é afetada pela nebulosidade vinda de norte, maioritariamente nos meses de inverno, prejudicial à penetração da radiação solar, nos dias de ventos alísios, conforme é visível a sua distribuição na figura 3.37.

Relativamente, à análise da variação anual da ISGD das EMAs deste concelho, podemos dividir em duas fases:

- A fase positiva da declinação solar, a partir do equinócio da primavera até ao equinócio de outono, onde engloba maioritariamente os meses de abril a agosto;
- A fase negativa da declinação solar, a partir do equinócio de outono até ao equinócio da primavera, onde são englobados os meses de setembro a março.

Assim, na fase positiva da declinação solar, a **EMA do Pico Verde** é privilegiada comparativamente à **EMA dos Prazeres**, devido à diferença de altitude ser de aproximadamente 332 m, capacitando-a de uma maior disponibilidade da radiação solar incidente, uma vez que a distância a percorrer pela radiação solar é menor logo, as perdas associadas, também. Esta justificação só é válida para os dias sem nebulosidade, pois as perdas associadas à absorção e reflexão, por parte das nuvens, não existe. Graficamente, dada a maior disponibilidade da radiação solar, na EMA do Pico Verde, existe uma maior diferença, relativamente à EMA dos Prazeres.

Por outro lado, na fase negativa da declinação, onde a elevação solar é a mais baixa e, dada a proximidade da EMA do Pico Verde à linha de cumeada Norte-Sul, existe uma maior influência por parte da nebulosidade vinda de norte o que se traduz numa menor quantidade da radiação solar incidente disponível. Graficamente, dada esta menor disponibilidade da radiação solar, na EMA do Pico Verde, a diferença entre os valores médios mensais também o é. Em termos anuais, a Irradiação Solar Global disponível nestas EMAs é de 1802 kWh/m² na EMA Pico Verde e de 1590 kWh/m² na EMA dos Prazeres.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAS DO CONCELHO DO FUNCHAL

No concelho do Funchal estão instaladas três EMAs, a primeira à cota dos 250 m, na zona de S. Martinho, a EMA do LREC, a EMA do Trapiche, à cota dos 590 m, e, a última, a EMA do Parque Ecológico do Funchal à cota dos 1300 m, geograficamente distribuídas, conforme a figura 3.41.



Figura 3.41 – Enquadramento das EMAs LREC do concelho do Funchal no mapa.

Analisando os valores da figura 3.42, do anexo A.1.8 e tendo em conta as características do local de implantação das estações, figura 3.37 e figura 3.41, podemos então iniciar a compreensão destes resultados.

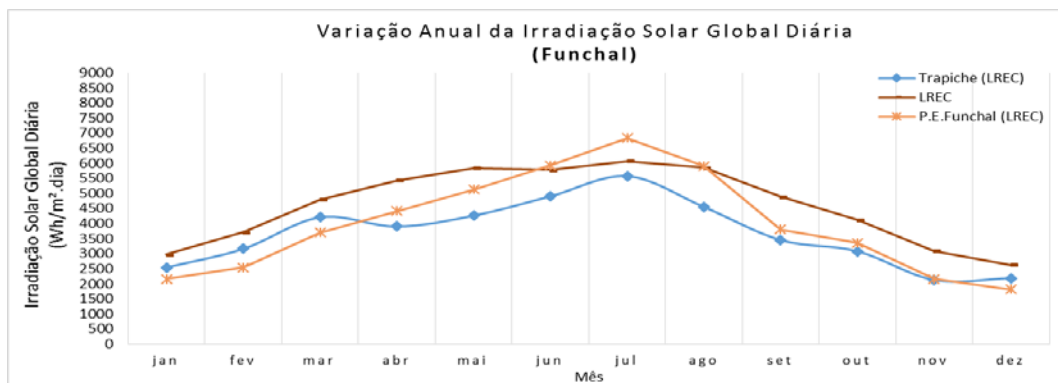


Figura 3.42 – Variação anual da ISGD, em Wh/m².dia, nas EMAs LREC do concelho do Funchal.

Partindo do facto das três estações, estarem instaladas no lado sul da ilha da Madeira, tal como as estações analisadas no ponto anterior, podemos realizar um breve estudo dos resultados apresentados, utilizando os princípios justificativos do ponto anterior, para compreender este ponto. No entanto, a partir de uma primeira observação, deparamo-nos que não só as evidências apresentadas no ponto anterior conseguem clarificar os resultados neste ponto. Pois, a ISGD na fase positiva da declinação solar não é superior, nas estações à cota mais alta, e, na fase negativa, as estações com cotas mais elevadas apresentam valores acentuadamente inferiores, aos da estação à cota mais baixa.

Assim, o primeiro passo é procurar compreender se os erros verificados poderão estar associados a estas estações. No anexo A.1.4 é apresentado uma tabela com a contabilização das lacunas da rede de EMAs LREC, onde a **EMA do Trapiche** é, das três estações, a mais afetada devido à sua alta percentagem, 35,5%, de dias com lacunas, seguida pela EMA do PE do Funchal com 20,9% e por fim, a EMA do LREC, com a percentagem mais baixa da rede de EMAs LREC com uns meros 3,4%.

De seguida, procurou-se outros fenómenos climatéricos que pudessem estar a influenciar estes resultados, o que segundo a literatura, poderá estar associado ao fenómeno denominado de “capacete”. Este fenómeno forma-se durante o dia, pela subida da brisa marítima ao longo das vertentes que enquadram a baía do

Funchal, devido aos contrastes térmicos que se criam diariamente entre a terra e o mar. Estes contrastes térmicos são responsáveis pelo desenvolvimento das brisas – “terral” e “embate” – na encosta meridional da ilha e que, por sua vez, associadas ao relevo, influenciam duramente a penetração da radiação solar (Fernandes, 2009; Figueira, 2009; Lopes, 2007; S. Prada et al., 2003; Susana Prada, 2000; Ribeiro, 1985).

O aparecimento do “capacete” é, então, claramente beneficiado pelos seguintes fatores:

- A orientação da cordilheira insular ser perpendicular à direção dos ventos húmidos dominantes de Nordeste, o que origina nuvens e nevoeiros orográficos. O ar húmido transportado no vento, ao encontrar a barreira montanhosa da ilha é forçado a subir, arrefecendo adiabaticamente (devido à diminuição da pressão atmosférica e ao encontro com temperaturas mais baixas) e condensando-se em pequenas partículas que se encontram em suspensão na atmosfera, constituindo-se nuvens e nevoeiros. Este fenómeno está representado na figura 3.23 (S. Prada et al., 2003);
- Em termos de variação anual da frequência deste fenómeno é pouco nítida, atingindo na Bica da Cana (Paúl da Serra), 235 dias/ano e no Pico do Areeiro (Maciço central), 229 dias/ano. Relativamente à cota, em que a cobertura nebulosa ocorre, esta fixa-se entre os 600-800 m e os 1600 m no Inverno, descendo mais abaixo no Verão (Figueira, 2009; Susana Prada, 2000);
- O Funchal ser uma cidade insular, de pequenas dimensões, posicionada junto ao litoral e, delimitada a Norte, por um sistema orográfico disposto em forma de arco e possuir um sistema de circulação de brisas, com uma frequência de ocorrência alta. De noite, a brisa de montanha atua em direção à cidade, vindo reforçar a brisa de terra em direção ao mar. De dia, a brisa do mar, mais forte na faixa costeira e fora da influência de superfícies rugosas, atua no mesmo sentido que a brisa do vale, fazendo aumentar a intensidades dos ventos ascendentes, aspeto igual no conjunto das vertentes viradas a sul (Lopes, 2007).

Assim, a formação do efeito de “capacete” consiste na formação de uma cobertura nebulosa parcial ou total, que se estabelece nas zonas altas do Funchal, entre os 700 m e os 1500 m, devido ao “embate” entre a brisa marítima associada à brisa de vale com a brisa de montanha, sendo mais frequente a sua ocorrência durante os meses de verão, muito embora ocorra também, nas outras estações do ano.

Relativamente à análise da variação anual da ISGD das EMAs LREC do concelho Funchal, figura 3.42 e, após, a enumeração dos fatores que a afetam consideravelmente, dos resultados obtidos, segue-se a compreensão dos mesmos.

A **EMA do PE do Funchal** é a estação que está à cota mais alta, das três estudadas neste concelho, visivelmente, é uma das mais afetadas pela nebulosidade, visto a mesma sofrer influências oriundas de duas direções. Do lado norte chegam à sua localização nuvens e neblinas, com pouca humidade onde tendem a dissipar na vertente sul. Esta nebulosidade irá afetar principalmente os valores da radiação solar nos meses de outono e inverno, na fase negativa da declinação solar. No entanto, a esta nebulosidade temos de associar a proveniente do “capacete” muito embora ocorra maioritariamente no verão, poderá ocorrer noutras

épocas. A nebulosidade proveniente, do lado sul do fenómeno “capacete”, como já foi referido a sua prevalência é nos meses de verão, onde afetam igualmente a penetração da radiação solar, daí que os valores da ISGD, no mês de julho, sejam muito próximos dos da EMA do LREC, que está à cota mais baixa, de entre as três estações. Dada a sua altitude, 1300 metros, seria de esperar que, na fase positiva da declinação solar (abril a agosto), apresentasse valores mais próximos dos verificados, na EMA do Pico Verde, no entanto, a nebulosidade proveniente do “capacete” afeta enormemente o seu valor.

A **EMA do LREC** dada a sua cota, na fase negativa da declinação solar, apresenta valores normais nas estações de outono e inverno. A nebulosidade que a afeta não está vincadamente ligada ao lado norte mas sim, a todas as vertentes. Na fase positiva da declinação solar podemos observar que, os valores registados entre os meses de maio a agosto, permanecem constantes, o que é justificado pelo fenómeno do “capacete”, embora a sua formação ocorra devido à brisa marítima, no sentido ascendente e, aconteça na faixa dos 700 m aos 1500 m de altitude, a sua prevalência seja mais notória, junto à montanha. Assim, dado que a **EMA do Trapiche** situa-se a aproximadamente quatro quilómetros da costa e menos de um quilómetro do coberto vegetal, do tipo plantado (acácias, pinheiros e eucaliptos) é igualmente afetada pelos dois tipos de nebulosidade, de norte e de sul (“capacete”), no entanto, dada a sua reduzida base de dados, devido a elevada percentagem de lacunas de dados, não podemos analisá-la corretamente.

Por fim, em termos anuais, a Irradiação Solar Global disponível nestas EMAs é de 1687 kWh/m² na EMA do LREC, 1333 kWh/m² na EMA do Trapiche e, de 1572 kWh/m² na EMA do PE do Funchal.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAS SITUADAS NOS EXTREMOS DE COTAS

O concelho da Ponta do Sol possui apenas uma estação, a EMA da Bica da Cana, à cota dos 1600 m, a mais alta de entre as estações da rede LREC, figura 3.43, e, o concelho de Machico é constituído pela EMA de Machico, a última, no lado sul da ilha da Madeira, figura 3.44, à cota dos 170 m, a mais baixa da rede LREC. Geograficamente podemos visualizar a distribuição destas EMAs na figura 3.37 e a variação anual da ISGD de ambas as estações na figura 3.45.

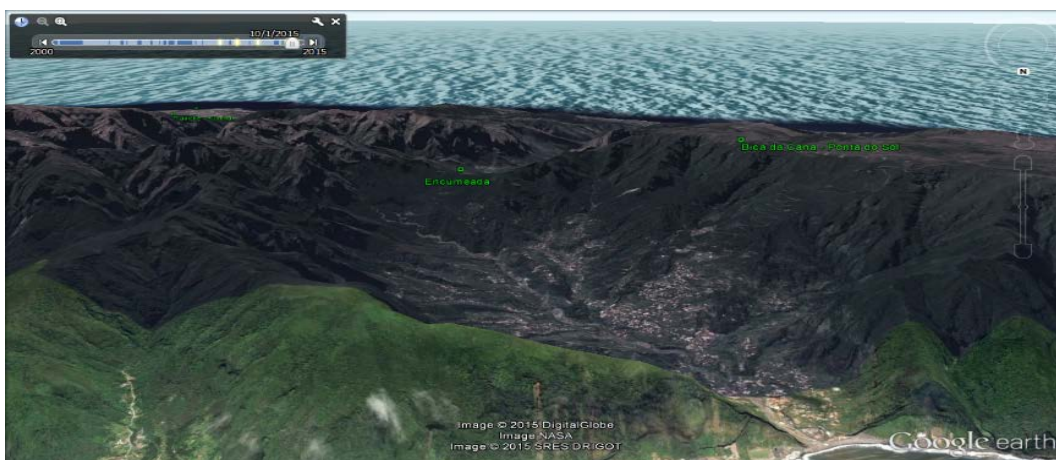


Figura 3.43 – Enquadramento da EMA da rede LREC à cota mais elevada no mapa.

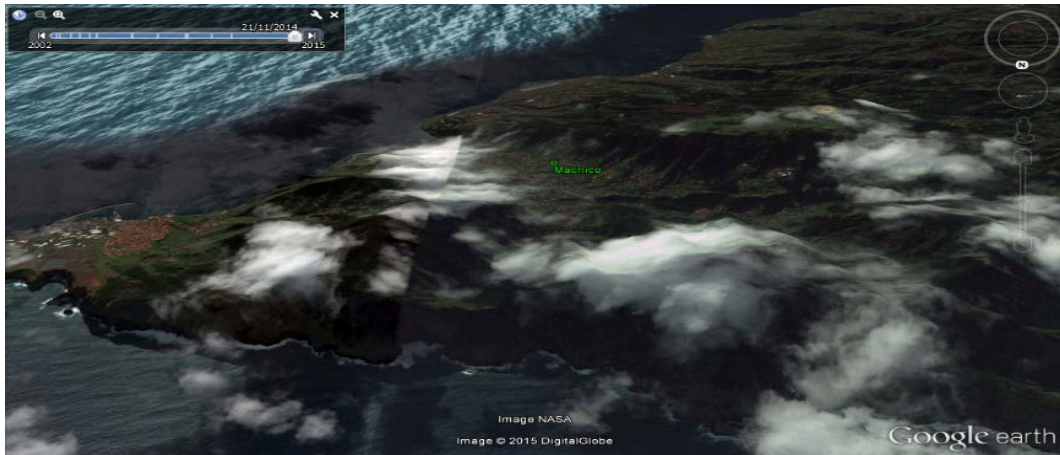


Figura 3.44 – Enquadramento da EMA da rede LREC à cota mais baixa no mapa.

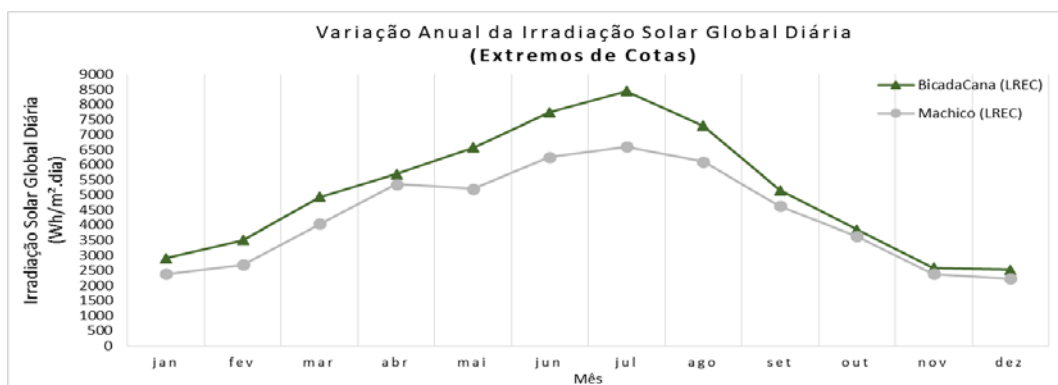


Figura 3.45 – Variação anual da ISGD, em Wh/m².dia, nas EMAs localizadas nos extremos de cota (altitude).

Analisando os valores da figura 3.45, do anexo A.1.8 e tendo em conta as características do local de implantação destas estações, figura 3.37, figura 3.43 e figura 3.44, podemos referir alguns aspetos que nos ajudam a compreender os resultados. Em termos de percentagem de dias sem dados, a EMA da Bica da Cana apresenta 9,1% e a EMA de Machico 11,5%.

A **EMA da Bica da Cana** fica situada no mais extenso planalto da ilha da Madeira, com cerca de 24 Km², e com uma altitude média de 1500 m. Esta EMA está localizada, na mais importante área de recarga de água subterrânea, dada à sua proximidade ao limite norte da linha de cumeada, entre o concelho da Ponta do Sol e o concelho de São Vicente. Esta EMA está localizada na zona de passagem/formação da nebulosidade e dos nevoeiros provenientes do movimento ascendente dos ventos de nordeste. Assim, em termos gráficos podemos observar que nos meses de verão, uma vez que a nebulosidade criada situa-se a cotas mais baixas, esta estação apresenta os valores médios ISGD mais altos de entre a rede de EMAs LREC. Por outro lado, nos meses de uma declinação solar mais baixa, constatamos uma acentuada queda na receção da radiação solar.

A **EMA de Machico** fica situada na vertente interior sudoeste do vale, formado por duas cadeias de montanhas (este e oeste) com declives suaves e moderados, que conferem-lhe um clima quente e seco, no entanto, dada a sua morfologia, é sujeita a nebulosidade de norte, no inverno, e menor número de horas de exposição solar.

Por fim, em termos anuais, a Irradiação Solar Global disponível nestas EMAs é de 1837 kWh/m² na EMA da Bica da Cana e de 1545 kWh/m² na EMA de Machico.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAS DO LADO NORTE

No lado norte da ilha da Madeira, em Santana, São Vicente e Porto Moniz, estão instaladas as restantes três estações meteorológicas automáticas da rede LREC. A EMA da Estação Zootécnica do Porto Moniz, situada à cota dos 675 m, localizada geograficamente na figura 3.46, a EMA do Pico das Pedras, em Santana, situada à cota dos 920 m e a EMA da Encumeada, em São Vicente, à cota dos 1017 m ambas representadas na figura 3.47.

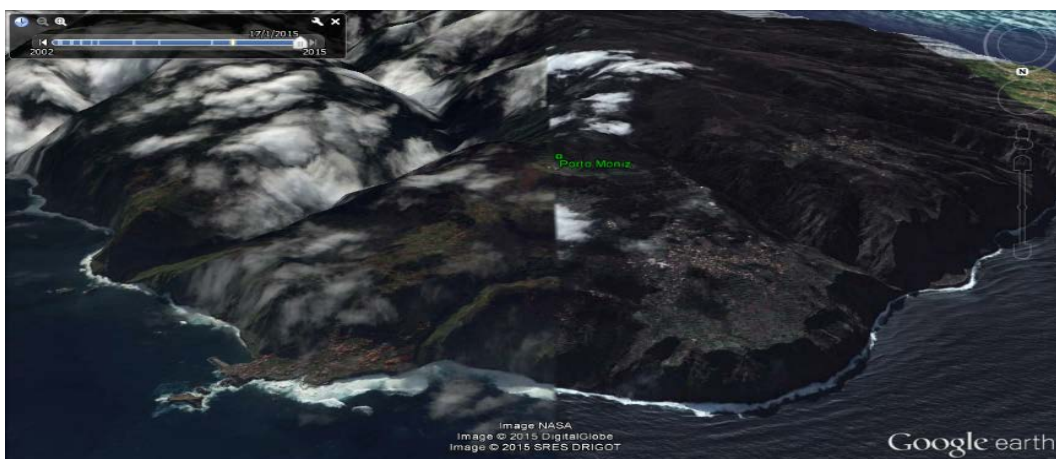


Figura 3.46 – Enquadramento da EMA LREC do concelho do Porto Moniz no mapa.



Figura 3.47 - Enquadramento das EMAs LREC dos concelhos de Santana e São Vicente no mapa.

Analisando os valores da figura 3.48, do anexo A.1.8 e tendo em conta as características do local de implantação destas estações, figura 3.37, figura 3.46 e figura 3.47, podemos referir alguns aspetos que nos ajudam a compreender os resultados.

Das três estações do lado norte da ilha, a EMA da Encumeada é a que apresenta uma das mais baixas percentagens de dias sem registos, 5,4%, seguido da EMA do Pico das Pedras, com 16% e da EMA do Porto Moniz, com 22,4%.

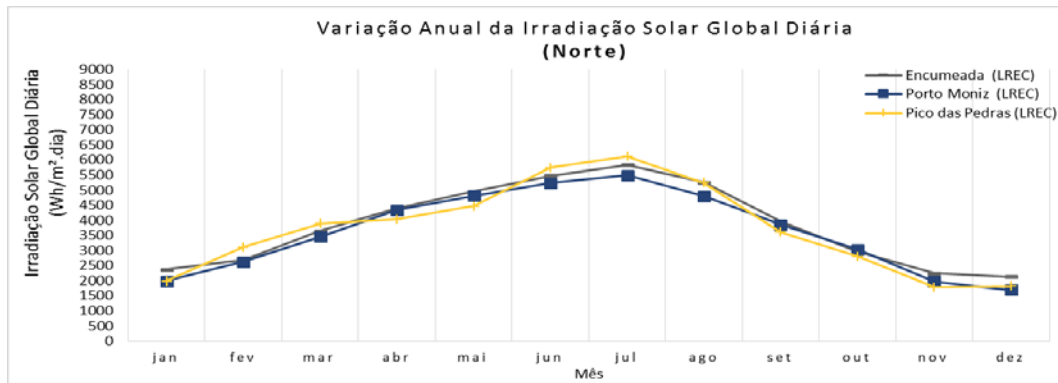


Figura 3.48 - Variação anual da ISGD, em Wh/m².dia, nas EMAs localizadas no norte da ilha.

Estas três estações são muito influenciadas pela nebulosidade característica do lado norte, pelo que, as estações que estão a cotas próximas dos 1000 m são muito afetadas, ao longo de todo o ano, por nebulosidade, nevoeiros e neblinas. A **EMA da Encumeada** situa-se numa zona de ocorrência frequente do *Fenómeno de Föhn*, dissipação da nebulosidade formada no norte, figura 3.23, que afeta a quantidade da irradiação solar que chega à superfície. A **EMA do Pico das Pedras** dada a sua proximidade às vertentes do Maciço Central, no coração da Floresta Laurissilva é igualmente afetada pela nebulosidade.

Por fim, em termos anuais, a Irradiação Solar Global disponível nestas EMAs é de 1389 kWh/m² na EMA da Encumeada, de 1360 kWh/m² na EMA de Santana e, de 1307 kWh/m² na **EMA do Porto Moniz**.

3.4.3 METODOLOGIA DA ANÁLISE DOS REGISTOS REDE DE EMAS IPMA

Tal como já foi referido, os registos da rede de EMAs IPMA foram cedidos pelo Dr. Victor Prior, Diretor da Delegação Regional do Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Os registos recebidos da rede IPMA já apresentavam as ausências de dados identificadas, pelo que, reduziu substancialmente o tempo necessário para a sua análise.

Passo 1: Reunir todos os registos da rede de EMAs, num novo ficheiro Excel (Dados REMA-IPMA.xlsm) com a totalidade das amostras correspondentes a um ano completo, 8760 dados, com as respetivas lacunas de dados identificadas;

Passo 2: Construir uma folha de cálculo no ficheiro anterior que permita introduzir os registos mensais de uma estação, e, posteriormente calcular o total da Irradiação Solar Global Diária (ISGD) (kJ/m².dia) e a Média Horária da Irradiação Solar Global (ISG) (kJ/m².h);

Passo 3: Armazenar em diferentes folhas, no ficheiro (Dados REMA-IPMA.xlsm), os resultados obtidos da variação diária do valor médio da Irradiação Solar Global Horária e da variação mensal da Irradiação Solar Global Diária para cada uma das estações estudadas;

Passo 4: Calcular a Média Mensal da Irradiação Solar Global Diária, permitindo calcular o total mensal e anual da Irradiação Solar Global para todas as EMAs;

Passo 5: Armazenar todos os resultados do passo anterior numa nova folha de cálculo denominada “Variação da ISG (kJ/m².dia)”. Calcular a Média Mensal da Irradiação Solar Global Diária do período compreendido entre o primeiro mês completo de dados (a instalação da rede de EMAs IPMA foi iniciada no ano de 2002 e terminou no ano de 2011) até o mês de agosto do ano de 2015, para cada EMA da rede IPMA. Na tabela 3.14 são apresentados o número de meses utilizado no cálculo da Média Mensal da ISGD de cada EMA da rede;

Tabela 3.14 – Número de meses utilizados para o cálculo da Média Mensal da ISGD em cada EMA da rede IPMA.

Instalação	26-abr-95	01-dez-14	26-abr-95	06-mar-14	11-fev-02	23-ago-10	23-ago-10	23-ago-10	11-fev-02
1º mês com dados	01-set-02	01-dez-14	01-out-03	01-abr-14	01-set-02	01-set-10	01-set-10	01-set-10	01-out-02
	Funchal Obs.	Aero. S. C.	Aero. P. Santo	Porto Moniz	São Jorge	Santana	São Vicente	Bica da Cana	Funchal Lido
Jan	14	1	13	1	14	5	5	6	12
Fev	14	1	13	1	14	5	5	6	12
Mar	14	1	13	1	14	5	5	6	12
Abr	14	1	13	2	14	5	5	6	12
Mai	14	1	13	2	14	5	5	6	12
Jun	14	1	13	2	14	5	5	6	12
Jul	14	1	13	2	14	5	5	6	12
Ago	14	1	13	2	14	5	5	6	12
Set	14	0	12	1	13	5	5	5	11
Out	13	0	12	1	13	5	5	5	12
Nov	13	0	12	1	13	5	5	5	12
Dez	13	1	12	1	13	5	5	5	12
Instalação	01-ago-14	11-fev-02	23-ago-10	11-jul-09	11-jul-09	23-ago-10	11-fev-02	11-fev-02	
1º mês com dados	01-jan-15	01-set-02	01-set-10	01-jan-10	01-ago-10	01-set-10	01-set-02	01-jan-07	
	Pico Alto	Chão Areeiro	Santo da Serra	Pt. S. Lourenço	Lombo da Terça	Quinta Grande	Lugar de Baixo	Ponta do Pargo	
Jan	1	12	5	5	6	5	13	9	
Fev	1	12	5	6	6	5	13	9	
Mar	1	12	5	6	6	5	13	9	
Abr	1	12	5	6	6	5	13	9	
Mai	1	12	5	6	6	5	13	9	
Jun	1	12	5	6	6	5	13	9	
Jul	1	12	5	6	6	5	13	9	
Ago	1	12	5	6	7	5	13	9	
Set	0	12	5	5	6	5	13	8	
Out	0	12	5	5	6	5	13	8	
Nov	0	12	5	5	6	5	13	8	
Dez	0	12	5	5	6	5	13	8	

Passo 6: Converter os resultados de joule (kJ/m².dia) para watt.hora (Wh/m².dia);

Passo 7: Construir os gráficos da variação anual da Irradiação Solar Global Diária.

3.4.4 SÍNTESE DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS IPMA

Relativamente aos resultados da análise dos registos da rede de EMAs IPMA, estes são apresentados no Anexo A.2, conforme a seguinte ordem:

- A.2.1 – Contabilização das lacunas de dias nos registos das EMAs da rede IPMA, entre o 1º mês completo de dados até agosto de 2015;
- A.2.2 – Contabilização dos meses utilizados no cálculo da variação anual da ISGD das EMAs da rede IPMA;
- A.2.3 – Variação anual da ISGD, nas EMAs da rede IPMA (Wh/m².dia);
- A.2.4 – Variação anual da ISGD, nas EMAs da rede IPMA (kJ/m².dia);
- A.2.5 – Irradiação Solar Global Anual disponível nas EMAs da rede IPMA (KWh/m²);
- A.2.6 – Gráficos da variação anual da Irradiação Solar Global Diária nas EMAs da rede IPMA, por concelho (Wh/m².dia).

3.4.5 ANÁLISE GRÁFICA DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS IPMA

A rede de EMAs IPMA, constituída por dezassete estações ativas, das quais dezasseis estão localizadas na ilha da Madeira e uma na ilha do Porto Santo, estão geograficamente distribuídas conforme é visível na figura 3.49. A figura 3.50 e figura 3.51 apresentam a variação anual da ISGD nesta rede de EMAs.



Figura 3.49 – Distribuição geográfica das estações da rede de EMAs IPMA no mapa.

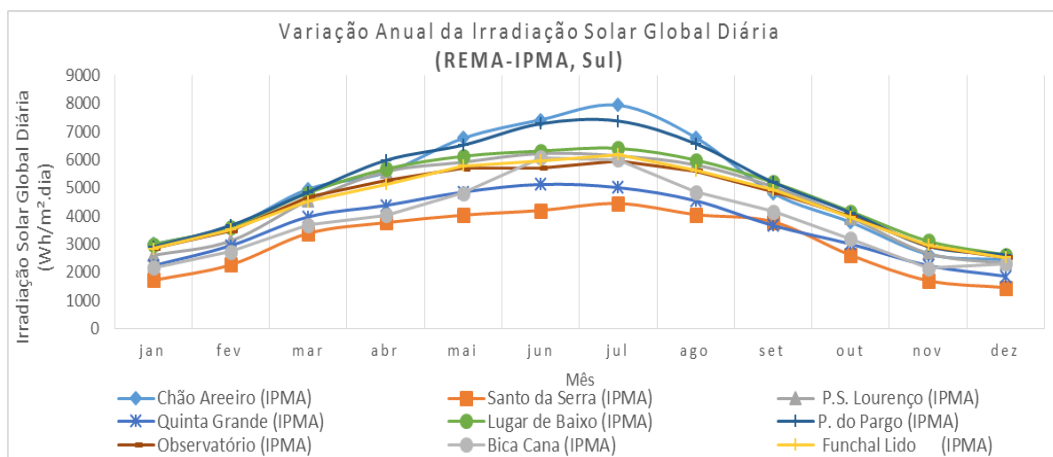


Figura 3.50 – Variação anual da ISGD em Wh/m².dia das EMAs IPMA do lado sul da ilha.

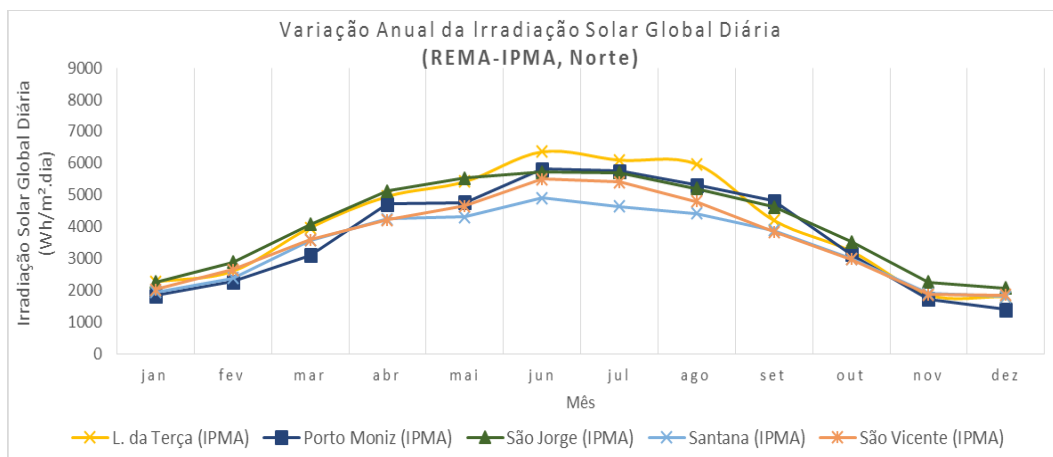


Figura 3.51 – Variação anual da ISGD em Wh/m².dia das EMAs IPMA do lado norte da ilha.

Analisando os valores apresentados no anexo A.2, figura 3.50 e figura 3.51 podemos concluir o seguinte:

- Em termos anuais, a Irradiação Solar Global disponível nestas EMAs, superior a 1500 kWh/m², por ordem decrescente, é observado: EMA da Ponta do Pargo (1818), EMA do Aeroporto do Porto Santo (1805), EMA do Chão do Areeiro (1790), EMA do Lugar de Baixo (1747), EMA do Observatório (1632), EMA da Ponta de São Lourenço (1623), EMA do Lido (1622), EMA da Bica da Cana (1621) e a EMA do Lombo da Terça (1536);
- Em termos anuais, a Irradiação Solar Global disponível nestas EMAs, inferior a 1500 kWh/m², por ordem decrescente, é observado: na EMA de São Jorge (1477), EMA da Quinta Grande (1341), EMA de São Vicente (1326), EMA de Santana (1261), EMA do Porto Moniz (1228) e na EMA do Santo da Serra (1103);
- A EMA do Aeroporto Santa Catarina e a EMA do Pico Alto, pelo facto de em agosto de 2015, ainda não terem completado um ano de funcionamento, não são consideradas nesta análise;
- O valor mais alto da ISGD foi observado, na EMA do Chão do Areeiro, no mês de Julho, com 7937 Wh/m².dia. O valor mais baixo da ISGD foi observado, na EMA do Porto Moniz, no mês de dezembro, com 1392 Wh/m².dia.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAS DO CONCELHO DO FUNCHAL

No concelho do Funchal ficam localizadas quatro EMAs: a EMA Lido, na Estação de Biologia Marinha, à cota dos 25 m, a EMA do Observatório, à cota dos 58 m, a EMA do Pico Alto, à cota dos 1158 m, e, a EMA do Chão do Areeiro, nos 1590 m. Geograficamente distribuídas conforme a figura 3.52 e graficamente os resultados da variação anual da ISGD das estações, exceto do Pico Alto, são apresentados na figura 3.53.

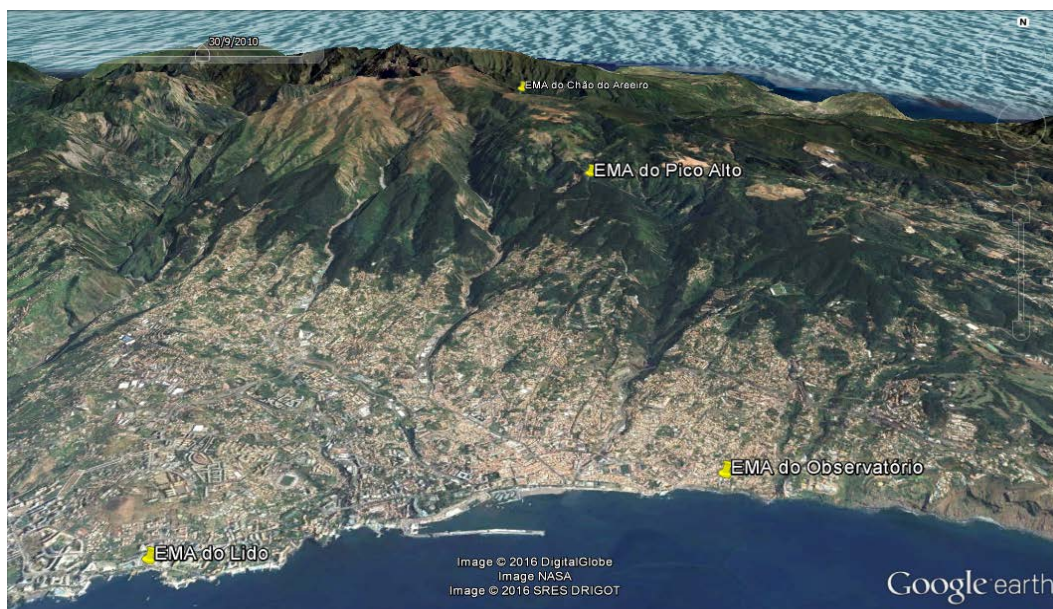


Figura 3.52 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho do Funchal no mapa.

Analisando os valores correspondentes a estas estações no anexo A.2, na figura 3.53, como também, o seu enquadramento na figura 3.49 e figura 3.52, permite-nos retirar algumas considerações sobre as EMAs IPMA do concelho do Funchal.

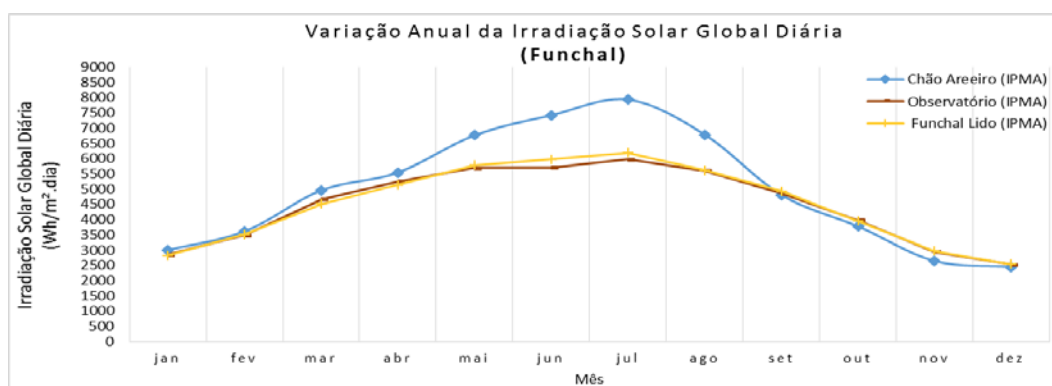


Figura 3.53 – Variação anual da ISGD em Wh/m².dia das EMAs IPMA do concelho do Funchal.

A **EMA do Observatório** e a **EMA do Lido** situam-se às cotas mais baixas, na faixa litoral, pelo que em termos médios diários, a variação anual da ISGD destas estações, apresenta-se muito próxima, durante todo o ano. A maior discrepância entre as estações é verificada nos meses de junho e julho, onde é a EMA do Lido que apresenta valores superiores. A **EMA do Observatório** funciona há 14 anos e, neste espaço temporal, apresenta 9,6% de lacunas de dias nos registos. A **EMA do Lido** funciona há 12 anos e, neste espaço temporal, apresenta 6,4%. Na fase positiva da declinação solar, de maio a agosto, estas estações apresentam valores superiores a 4850 Wh/m².dia, tendencialmente constantes, aspeto que, poderá ser justificado, pelo fenómeno do “capacete” (predominante nos meses de verão).

A **EMA do Chão do Areeiro**, tal como o nome indica, situa-se num pequeno planalto localizado a sudeste do Pico do Areeiro e, as suas pequenas encostas são circundadas por vegetação de altitude autóctone da ilha. Esta EMA funciona há 12 anos e, neste espaço temporal, apresenta 9,4% de lacunas de dias nos registos. Esta estação apresenta a média diária mais alta da ISG de entre as EMAs do concelho do Funchal e a segunda maior de entre a rede IPMA, com 4976 Wh/m².dia.

Na fase positiva da declinação solar esta estação apresenta valores superiores a 4800 Wh/m².dia, atingindo no mês de julho 7937 Wh/m².dia. Na fase negativa da declinação solar, devido à influência da nebulosidade e nevoeiros caraterísticos desta época neste local, proveniente do lado norte, apresenta valores próximos das restantes estações do concelho do Funchal, atingindo em dezembro 2445 Wh/m².dia.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAs DO CONCELHO DE MACHICO

O concelho de Machico apresenta duas estações, a EMA do Santo da Serra situada no Jardim Público da Quinta do Santo da Serra, à cota dos 660 m, e, a EMA da Ponta de São Lourenço, localizada na ponta mais a leste da ilha, à cota dos 132 m. Geograficamente distribuídas conforme a figura 3.54 e graficamente os resultados da variação anual da ISGD das estações são apresentados na figura 3.55.

Analisando os valores correspondentes a estas estações no anexo A.2, na figura 3.55, como também, o seu enquadramento na figura 3.49 e na figura 3.55, podemos apontar as seguintes considerações sobre as EMAs IPMA, no concelho de Machico.



Figura 3.54- Enquadramento das EMAs IPMA do concelho Machico no mapa.

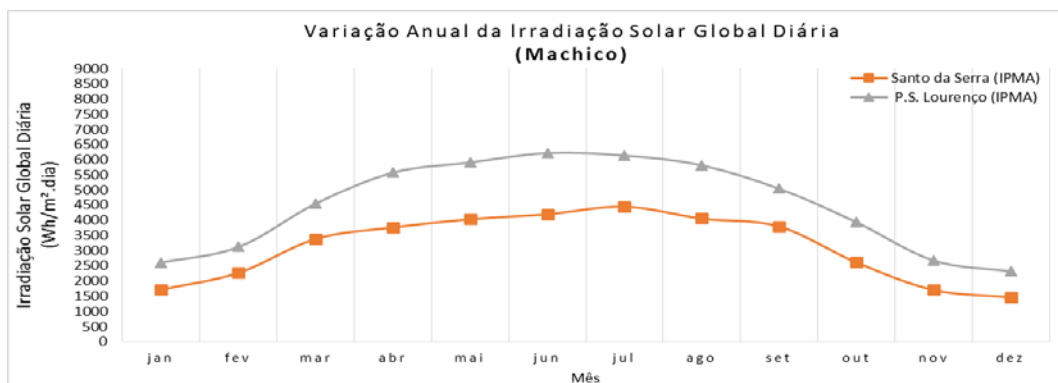


Figura 3.55 – Variação anual da ISGD em Wh/m².dia das EMAs IPMA do concelho de Machico.

A **EMA do Santo da Serra** funciona há 5 anos e, neste espaço temporal, apresenta 2,8% de lacunas de dias nos registos. Esta estação apresenta a média anual mais baixa de ISGD de entre a rede de EMAs IPMA, com 3121 Wh/m².dia. Na fase positiva da declinação solar esta estação apresenta valores de ISGD superiores a 3750 Wh/m².dia e inferiores a 4500 Wh/m².dia. Esta estação é fortemente prejudicada pelas características orográficas do local, planalto que é rodeado por montanhas a este, sul e oeste. A vegetação predominante é composta por castanheiros, acácias e sabugueiros. O clima é húmido e fresco. Estas características induzem não só a uma acentuada exposição do local à nebulosidade e precipitação vinda de norte, como também a uma diminuição da exposição e receção solar desta zona.

A **EMA da Ponta de São Lourenço** funciona há 6 anos e, neste espaço temporal, apresenta 1,2% de lacunas de dias nos registos. Em termos médios anuais, a Irradiação Solar Global Diária disponível nesta estação é de 4493 Wh/m².dia. Na fase positiva da declinação solar esta estação apresenta valores de ISGD superiores a 5000 Wh/m².dia. Esta EMA localiza-se na ponta mais a leste da Madeira, apresentando um clima semiárido e uma considerável exposição aos ventos do Norte que determinam o desenvolvimento de vegetação rasteira e ausência de árvores.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAS DO CONCELHO DE CÂMARA DE LOBOS

O concelho de Câmara de Lobos apresenta apenas uma estação localizada na freguesia da Quinta Grande, à cota dos 458 m. Geograficamente encontra-se localizada, no interior de um vale, conforme é visível na figura 3.56 e graficamente os resultados da Variação Anual da ISGD da estação são apresentados na figura 3.57.



Figura 3.56 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho de Câmara de Lobos no mapa.

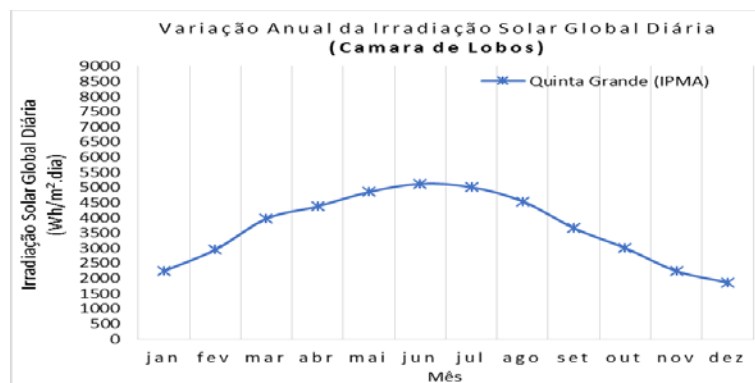


Figura 3.57 – Variação anual da ISGD em Wh/m².dia da EMA IPMA do concelho de Câmara de Lobos.

Analisando os valores correspondentes a esta estação no anexo A.2, na figura 3.57, como também, o seu enquadramento na figura 3.56 e figura 3.49, podemos apontar as seguintes considerações sobre a EMA em análise.

A **EMA da Quinta Grande** está em funcionamento há cinco anos e não apresenta lacunas de dias nos registos, o que a torna na estação mais funcional da rede IPMA. Apresenta a quarta média anual mais baixa da ISGD, de entre a rede de EMAs IPMA, a segunda mais baixa, do lado sul da ilha, e, a mais baixa de entre as estações do litoral sul, com 3654 Wh/m².dia. Em termos médios anuais, a Irradiação Solar Global disponível nesta estação é de 1341 kWh/m². Na fase positiva da declinação solar esta estação apresenta valores de ISGD superiores a 3660 Wh/m².dia. Está localizada no centro de um vale curvo, com orientação para o lado oeste da ilha, associado a esta orografia estão vários efeitos, um deles é o efeito de sombreamento, nas primeiras horas do dia, e, nas últimas horas do dia, outro efeito é a nebulosidade ali originada, na fase positiva da declinação solar, e, da nebulosidade proveniente de norte, maioritariamente na fase negativa da declinação solar.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAS DO CONCELHO DA PONTA DO SOL

O concelho da Ponta do Sol apresenta duas estações: a EMA do Lugar de Baixo, na Estação de Floricultura, localizada à cota dos 42 m e a EMA da Bica da Cana, à cota dos 1560 m, localizada na linha limite de divisão administrativa entre os concelhos da Ponta do Sol e de São Vicente. Assim sendo, esta última será englobada na análise aos dois concelhos visados. Geograficamente encontra-se localizada no interior de um vale conforme é visível na figura 3.58 e graficamente os resultados da variação anual da ISGD das estações é apresentado na figura 3.59.



Figura 3.58 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho da Ponta do Sol no mapa.

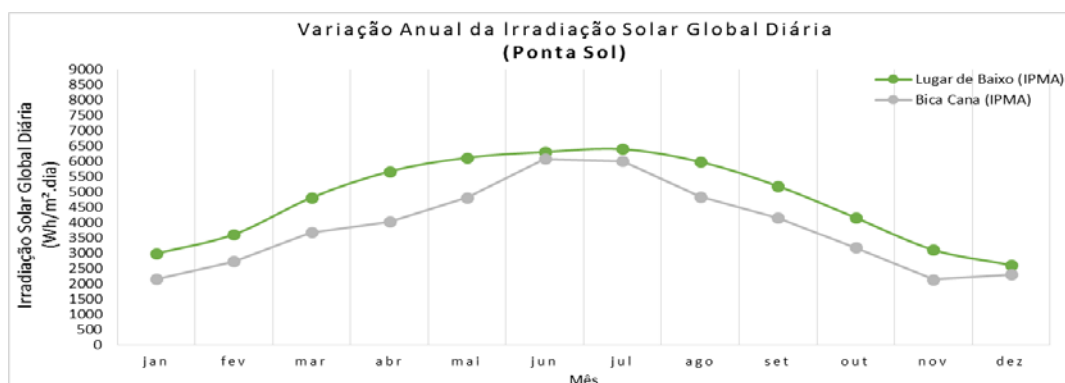


Figura 3.59 – Variação anual da ISGD em Wh/m².dia das EMAs IPMA do Concelho da Ponta do Sol.

Analisando os valores correspondentes a estas estações no anexo A.2, na figura 3.59, como também, o seu enquadramento na figura 3.58 e figura 3.49, podemos apontar as seguintes considerações sobre as EMAs em análise.

A **EMA do Lugar de Baixo** funciona há 13 anos e, neste espaço temporal, apresenta 6,9% de lacunas de dias nos registos. Em termos médios anuais, a ISGD disponível nesta estação é de 4752 Wh/m².dia. Na fase positiva da declinação solar, esta estação apresenta valores superiores a 5000 Wh/m².dia. A **EMA da Bica da Cana** apresenta um funcionamento de quase 6 anos, onde neste período não apresenta lacunas de dias nos registos. Em termos médios anuais, a ISGD disponível nesta estação é de 3847 Wh/m².dia. O valor mais alto da média mensal da ISGD é obtido no mês de junho, com 6084 Wh/m².dia, mantendo-se parcialmente constante até o mês de julho, com 6006 Wh/m².dia. Comparando as duas estações em estudo, tendo por

base os valores da cota de instalação da estação e da variação anual da ISGD, podemos verificar que EMA da Bica da Cana, à cota dos 1560 m, apresenta valores inferiores, na fase positiva da declinação solar, aos da EMA do Lugar de Baixo, à cota dos 42 m, facto justificado pela forte prevalência de nebulosidade na zona da Bica da Cana e pela sua localização geográfica no limiar do planalto de separação do lado sul com o lado norte da ilha. Em termos médios anuais, a Irradiação Solar Global disponível nesta estação é de 1747 kWh/m² na EMA do Lugar de Baixo e de 1621 kWh/m² na EMA da Bica da Cana.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD DA EMA DO CONCELHO DA CALHETA

O concelho da Calheta apresenta apenas uma estação que fica localizada na freguesia da Ponta do Pargo, à cota dos 278 m. Geograficamente encontra-se localizada no local mais ocidental da ilha da Madeira, junto ao Farol da Ponta do Pargo, conforme é visível na figura 3.60 e graficamente os resultados da variação anual da ISGD da estação são apresentados na figura 3.61.



Figura 3.60 - Enquadramento da EMA IPMA do concelho da Calheta no mapa.

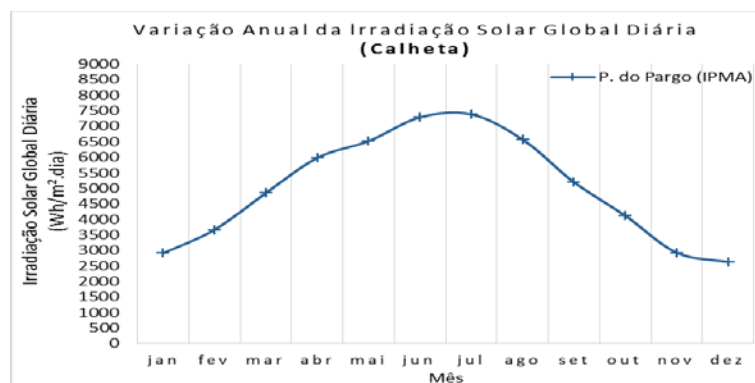


Figura 3.61 – Variação anual da ISGD em Wh/m².dia da EMA IPMA do Concelho da Calheta.

Analisando os valores correspondentes a esta estação no anexo A.2, na figura 3.61, como também, o seu enquadramento na figura 3.60 e figura 3.49, podemos apontar as seguintes considerações sobre a EMA em análise. A **EMA da Ponta do Pargo** apresenta um funcionamento de aproximadamente 9 anos, onde neste espaço temporal, apresentou 3,9% de lacunas de dias nos registos. Esta estação apresenta a média anual mais alta da ISGD de entre a rede IPMA, com 5003 Wh/m².dia. Na fase positiva da declinação solar esta estação apresenta valores superiores a 5000 Wh/m².dia, atingindo nos meses de junho e julho os valores pico

de aproximadamente 7300 Wh/m².dia. Em termos médios anuais, a Irradiação Solar Global disponível nesta estação é de 1818 kWh/m².

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAS DO CONCELHO DO PORTO MONIZ

O concelho do Porto Moniz possui duas estações, a primeira está localizada no centro da freguesia, à cota dos 35 m, e, a segunda localizada no Pico do Lombo da Terça, à cota dos 934 m. Geograficamente encontram-se localizadas conforme é visível na figura 3.62 e graficamente os resultados da variação anual da ISGD das estações são apresentados na figura 3.63.



Figura 3.62 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho do Porto Moniz no mapa.

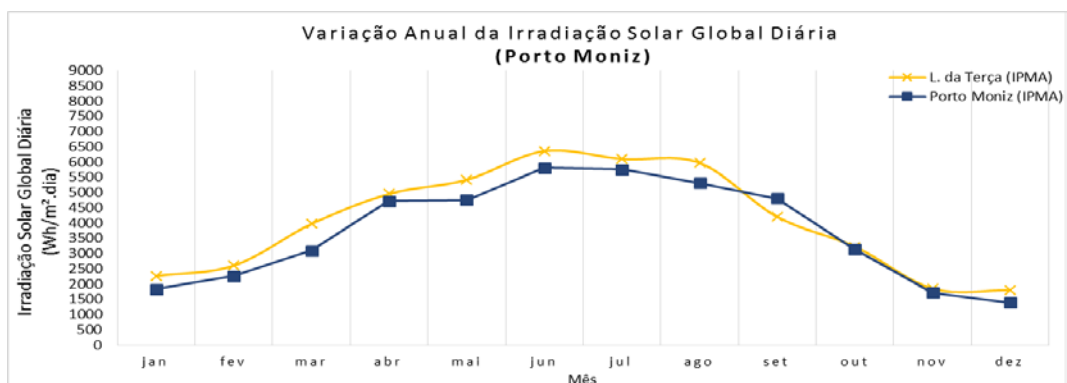


Figura 3.63 – Variação anual da ISGD em Wh/m².dia das EMAs IPMA do concelho do Porto Moniz.

Analisando os valores correspondentes a estas estações no anexo A.2, na figura 3.63, como também, o seu enquadramento na figura 3.62 e figura 3.49, podemos apontar as seguintes considerações sobre a EMAs em análise.

A **EMA do Porto Moniz**, localizada no centro da freguesia, apresenta um funcionamento ainda curto, visto ter iniciado o seu pleno funcionamento em abril do ano de 2014, o que lhe confere um funcionamento de um ano e cinco meses, apresentando neste período 0,6% de lacunas de dias nos registos. Esta estação apresenta a quinta média anual mais baixa da ISGD de entre a rede de EMAs IPMA, com 3715 Wh/m².dia. Na fase positiva da declinação solar, esta estação apresenta valores superiores a 4700 Wh/m².dia, atingindo nos meses de junho e julho os valores pico de aproximadamente 5750 Wh/m².dia. Na fase negativa da declinação solar, apresenta valores inferiores a 3000 Wh/m².dia, atingindo no mês de dezembro 1392 Wh/m².dia.

Embora esta estação apresente um curto período de funcionamento, os valores obtidos são justificados quase na sua totalidade pelo facto de a localização geográfica, no centro da freguesia, ser uma fajã (plataforma litoral) que capacita este centro de uma privilegiada exposição solar na fase positiva da declinação solar. Na fase negativa da declinação solar, esta característica é sobreposta pela nebulosidade singular característica e predominante do local.

A **EMA do Pico do Lombo da Terça** apresenta um funcionamento mais longo que o da estação anterior, seis anos, e neste período apresentou 3,9% de lacunas de dias nos registos. Esta estação apresenta a sétima média anual mais baixa da ISGD de entre a rede de EMAs IPMA, com 4057 Wh/m².dia. Na fase positiva da declinação solar, esta estação apresenta valores superiores a 4000 Wh/m².dia, atingindo no mês de junho o valor pico de 6355 Wh/m².dia. Relativamente aos valores obtidos na EMA do Lombo da Terça, uma vez que, esta localiza-se na linha de fêsto, circundada por vegetação de altitude (cota dos 1000 m), são os esperados. Na fase negativa da declinação sofre forte influência da nebulosidade característica do lado norte, apresentando valores próximos aos da EMA do Porto Moniz.

Em termos anuais, a Irradiação Solar Global disponível nestas estações é de 1536 kWh/m² na EMA da Lombo da Terça e de 1228 kWh/m² na EMA do Porto Moniz.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAS DO CONCELHO DE SÃO VICENTE

O concelho de São Vicente possui duas estações, a primeira está localizada no Posto Florestal de São Vicente, à cota dos 110 m, e a EMA da Bica da Cana, à cota dos 1560 m localizada na linha limite de divisão administrativa entre os concelhos da Ponta do Sol e de São Vicente. Geograficamente encontram-se localizadas conforme é visível na figura 3.64 e graficamente os resultados da variação anual da ISGD das estações são apresentados na figura 3.65.

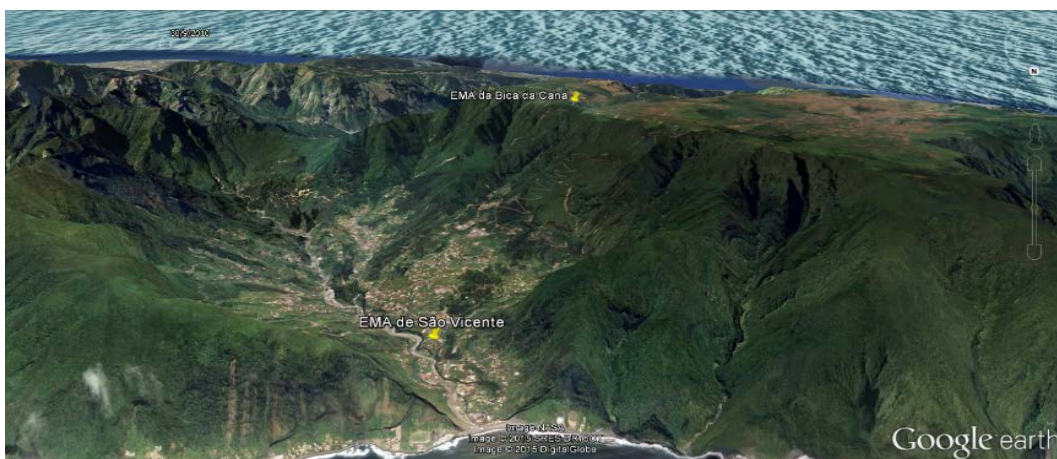


Figura 3.64 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho de São Vicente no mapa.

Analisando os valores correspondentes a estas estações no anexo A.2, na figura 3.65, como também, o seu enquadramento na figura 3.64 e figura 3.49, podemos apontar as seguintes considerações sobre as EMAs em análise.

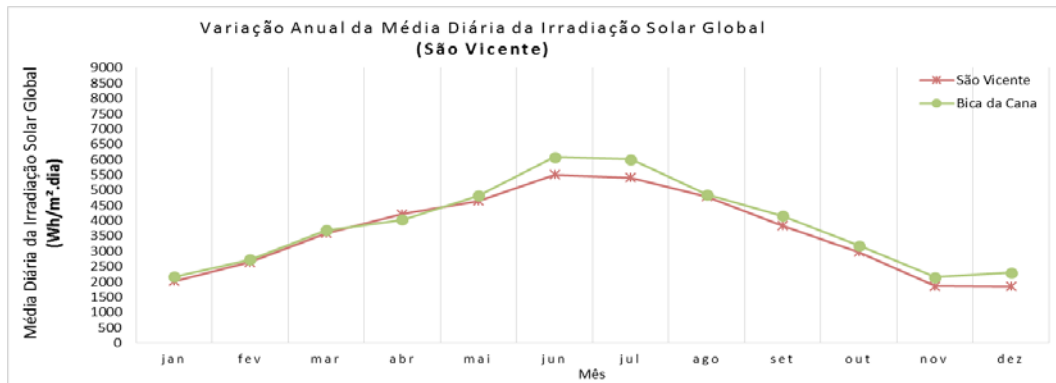


Figura 3.65 – Variação anual da ISGD em Wh/m².dia das EMAs IPMA do Concelho de São Vicente.

A EMA de São Vicente funciona há 5 anos e, neste período, não apresentou lacunas de dias nos registos. Em termos médios anuais, a ISGD disponível nesta estação é de 3613 Wh/m².dia, a terceira mais pequena da rede de EMAs IPMA. O valor mais alto da média mensal de ISGD é obtido no mês de junho com 5500 Wh/m².dia, mantendo-se parcialmente constante, até o mês de julho com 5400 Wh/m².dia. Comparando estas duas estações, podemos verificar que a EMA da Bica da Cana à cota dos 1560 m apresenta valores relativamente próximos aos da EMA de São Vicente durante a maioria dos meses, excetuando nos meses de junho e julho, onde é notoriamente mais expressiva, cerca de 550 Wh/m².dia. Esta diferença é justificada pelo facto da EMA de São Vicente estar sujeita às influências atmosféricas características do lado norte, tal como, a EMA da Bica da Cana, uma vez que está localizada na extremidade de separação do planalto com o vale de São Vicente e ser igualmente prejudicada pela forte prevalência de nebulosidade.

Em termos anuais, a Irradiação Solar Global disponível nestas estações é de 1326 kWh/m² na EMA de São Vicente e de 1621 kWh/m² na EMA da Bica da Cana.

ANÁLISE DA VARIAÇÃO ANUAL DA ISGD NAS EMAS DO CONCELHO DE SANTANA

O concelho de Santana possui duas estações, a primeira está localizada no Farol de São Jorge, à cota dos 258 m, e, a segunda a EMA da estação agrícola de Santana, à cota dos 380 m. Geograficamente encontram-se localizadas conforme é visível na figura 3.67 e graficamente os resultados da variação anual da ISGD da estação são apresentados na figura 3.66.

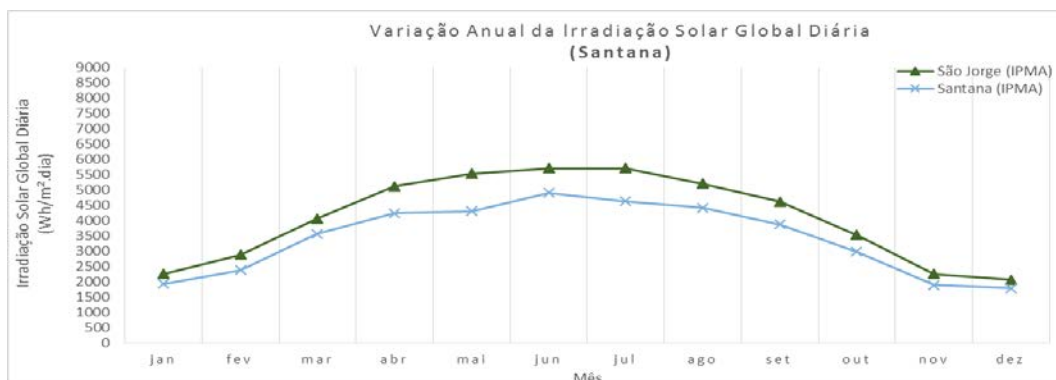


Figura 3.66 – Variação anual da ISGD em Wh/m².dia das EMAs IPMA do concelho de Santana.

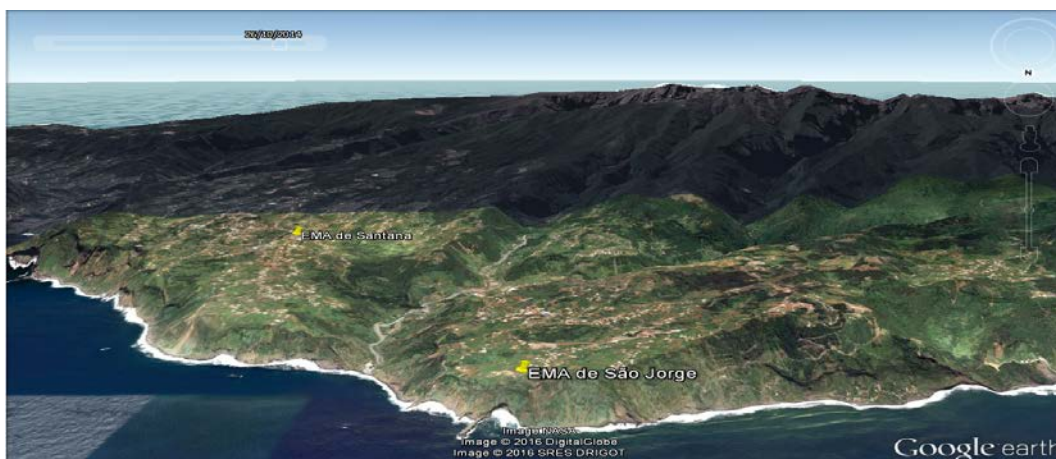


Figura 3.67 - Enquadramento das EMAs IPMA do concelho de Santana no mapa.

Analisando os valores correspondentes a estas estações no anexo A.2, na figura 3.66, como também, o seu enquadramento na figura 3.67 e figura 3.49, podemos apontar as seguintes considerações sobre as EMAs em análise. A **EMA do Farol de São Jorge** funciona há 14 anos e, neste período, apresentou 7,6% de lacunas de dias nos registos. Em termos médios anuais, a ISGD disponível nesta estação é de $4079 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, a oitava mais pequena da rede de EMAs IPMA. Na fase positiva da declinação solar, esta estação apresenta valores superiores a $4600 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, atingindo nos meses de junho e julho, os valores pico de aproximadamente $5700 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$.

A **EMA da Estação Agrícola de Santana** está em funcionamento há 5 anos, e neste espaço temporal, não apresentou lacunas de dias nos registos. Esta estação regista, a segunda média anual mais baixa da ISGD, de entre a rede de EMAs IPMA, com $3413 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$. Na fase positiva da declinação solar, esta estação apresenta valores superiores $3800 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, atingindo no mês de julho o valor pico de aproximadamente $4900 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$. A EMA de Santana, embora se situe a uma cota superior à da EMA de São Jorge, a sua maior proximidade ao Maciço Central, zona de formação e prevalência de nebulosidade provocada pelos ventos alísios, afeta a disponibilidade de radiação solar nesta zona, daí que as estações mais distantes do Maciço Central apresentem maior disponibilidade de radiação solar.

Em termos anuais, a Irradiação Solar Global disponível nestas estações é de 1261 kWh/m^2 , na EMA de Santana e de 1477 kWh/m^2 , na EMA de São Jorge.

3.4.6 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS REGISTOS, DAS EMAS, DA REDE LREC E OS DA REDE IPMA

Neste ponto, será realizada uma comparação, entre os registos da rede de EMAs LREC e os da rede de EMAs IPMA, por concelho, em dois períodos de tempo. O primeiro período de tempo a estudar, compreenderá o primeiro mês completo de dados até o mês de agosto do ano de 2015 e, o segundo período de tempo compreenderá os oito meses de registos, do ano de 2015. Esta comparação permitirá primeiramente avaliar a variação anual da ISGD das EMAs de redes diferentes, no mesmo concelho. Uma vez que, existem estações com um curto período de funcionamento, será estudada a sua variação anual da ISGD, nos últimos oito meses, que dispomos de dados.

ANÁLISE COMPARATIVA ÀS EMAS DO CONCELHO DO FUNCHAL

No concelho do Funchal ficam localizadas quatro EMAs da rede IPMA e três da rede LREC:

- EMA Lido (IPMA), à cota dos 25 m; EMA do Observatório (IPMA), à cota dos 58 m; EMA do Pico Alto (IPMA), à cota dos 1158 m; EMA do Chão do Areeiro (IPMA), à cota dos 1590 m;
- EMA do LREC, à cota dos 250 m; EMA do Trapiche (LREC), à cota dos 590 m; EMA do PE do Funchal (LREC), à cota dos 1300 m.

Geograficamente, estas estações encontram-se localizadas conforme é visível na figura 3.68.



Figura 3.68 - Enquadramento das EMAs LREC e IPMA do concelho Funchal no mapa.

Relativamente à variação anual da ISGD das EMAs LREC e IPMA do concelho do Funchal, entre o primeiro mês completo de dados e o mês de agosto de 2015, é apresentado na figura 3.69 e, entre o mês de janeiro e de agosto de 2015, na figura 3.70.

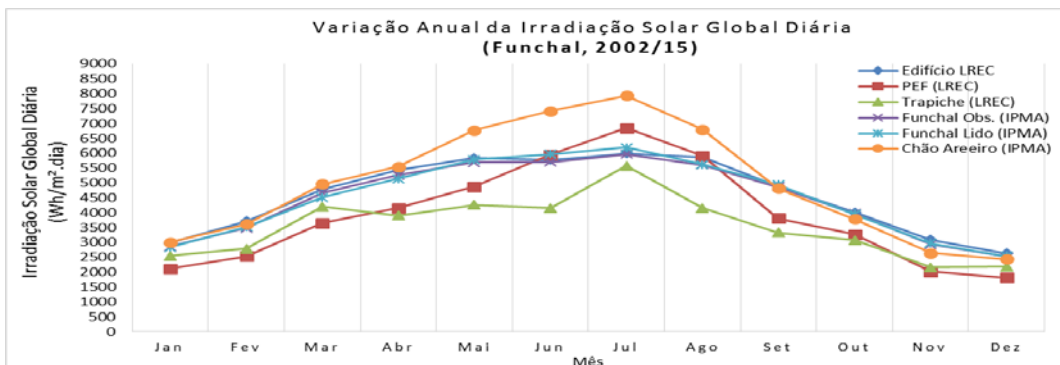


Figura 3.69 - Variação anual da ISGD das EMAs LREC e IPMA do concelho do Funchal.

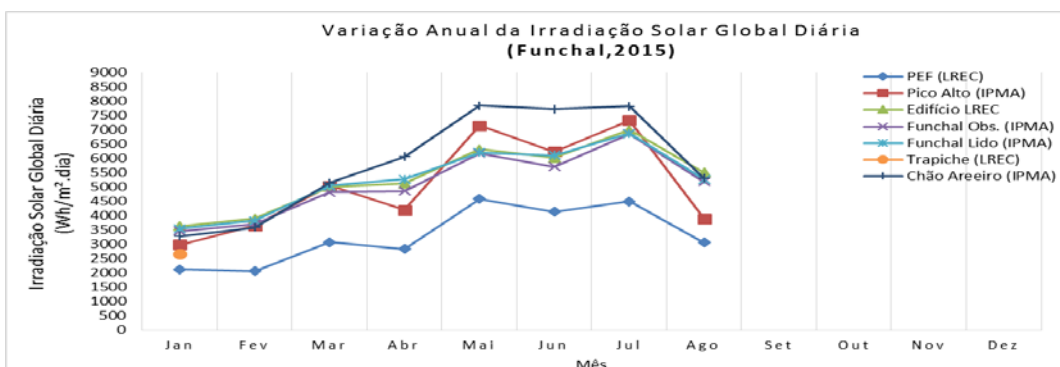


Figura 3.70 – Variação anual da ISGD das EMAs LREC e IPMA do concelho do Funchal entre 01/15 a 08/15.

Assim, analisando os valores correspondentes a estas estações no anexo A.3, na figura 3.69 e figura 3.70, como também, o seu enquadramento na figura 3.68, podemos apontar as seguintes considerações para cada um dos dois períodos de análise:

- Variação anual da ISGD das EMAs do Funchal entre o 1º mês completo e 08/2015:

As três estações, **EMA do LREC**, **EMA do Observatório** e, a **EMA do Lido** que se situam abaixo da cota dos 260 m apresentam uma variação anual muito próxima. Em termos médios anuais, a ISGD nestas estações é de 4583 Wh/m².dia na EMA do LREC, 4462 Wh/m².dia na EMA do Observatório e, 4496 Wh/m².dia na EMA do Lido. Na fase positiva da declinação solar, como já foi explicado anteriormente, a radiação solar que chega à superfície é atenuada pelo efeito “capacete”, pelo que, as estações a cotas superiores até os 1000 m apresentam uma maior quebra na ISGD.

A **EMA do Trapiche**, à cota dos 590 m, demonstra bem a forte influência deste fenómeno nos seus resultados, sendo que globalmente apresenta valores muito inferiores, comparativamente com os das estações, a cotas mais baixas. Na fase negativa da declinação solar, dado que se situa a aproximadamente quatro quilómetros da costa e menos de um quilómetro do coberto vegetal, do tipo plantado (acácias, pinheiros e eucaliptos) é fortemente afetada pela nebulosidade proveniente não só de norte, mas também formada junto do coberto vegetal. No entanto, a análise dos resultados desta estação, necessitam de especial cuidado devido à sua base de dados apresentar uma elevada percentagem de lacunas de registos;

A **EMA do Chão do Areeiro**, na fase positiva da declinação solar, não sofre influência do fenómeno “capacete”, dada a sua cota de instalação 1590 m. Na fase negativa da declinação solar, como era de esperar apresenta uma grande quebra nos valores de ISGD devido não só às circunstâncias da posição solar, como também, da influência da nebulosidade característica da época.

A **EMA do PE do Funchal**, situada à cota dos 1300 m, apresenta globalmente uma quebra da ISGD, esta quebra suscita questões sobre o seu correto funcionamento. Os fatores que podem influenciar a sua performance são: a nebulosidade proveniente de norte, que tende a dissipar neste local, a elevada percentagem de lacunas de dias que esta estação apresenta, 20,9%, o efeito “capacete” característico do Funchal e, a quebra de sensibilidade do sensor (SP Lite), inferior a 2% ano, devido à inexistência de manutenção na rede de EMAs LREC. No entanto, a EMA do Pico Alto, da rede IPMA, devido ao seu curto intervalo de funcionamento, janeiro a agosto de 2015, não permitia a validação dos valores da variação anual da EMA do PE do Funchal, pelo que, foi realizada uma segunda análise comparativa entre os registos de ambas as redes, por concelho, mas no intervalo de tempo compreendido entre janeiro a agosto de 2015.

- Variação anual da ISGD das EMAs do Funchal entre 01/2015 e 08/2015:

Esta análise, que compreende os últimos oito meses de registos disponibilizados, ou seja, entre janeiro e agosto de 2015, com o objetivo principal de incluir no estudo comparativo entre as estações do concelho do Funchal, os registos da EMA do Pico Alto e, analisar a estabilidade anual da diferença da ISGD entre EMAs.

Relativamente às três estações, localizadas às cotas mais baixas, os valores recolhidos nestes oito meses, não apresentam nenhuma variação que invalide todas as considerações apresentadas anteriormente.

A **EMA do Trapiche** continua com as falhas de funcionamento, pelo que, nestes oito meses em análise, só funcionou no primeiro, onde apresentou a segunda média mensal da ISGD mais baixa, com 2669 Wh/m².dia.

A **EMA do Chão do Areeiro**, os valores apresentados neste intervalo de tempo, estão de acordo com o que já foi referido sobre a mesma, não apresentando diferenças que suscitem dúvidas.

A nova EMA da rede IPMA, situada à cota dos 1118 m, no Pico que lhe deu o nome, **EMA do Pico Alto** e, próxima do Centro de Receção ao Parque Ecológico do Funchal não apresentou, neste curto espaço de tempo de funcionamento, lacunas de dias nos registos. A área circundante é composta por árvores e arbustos autóctones da ilha da Madeira. Relativamente à variação anual da ISGD apresentada por esta estação, figura 3.70, é de destacar que, entre os meses de janeiro a abril, os valores apresentados são inferiores aos das restantes estações, entre maio e julho, apresentou os valores mais altos a seguir aos da EMA do Chão do Areeiro e, em agosto voltou a apresentar os valores mais baixos de entre as estações. Nesta caracterização dos valores da EMA do Pico Alto não foi considerado os valores da EMA do PE do Funchal pois como foi referido anteriormente aparentemente não correspondiam ao esperado. Assim, comparando os valores da EMA do PE do Funchal com os da EMA do Pico Alto, constamos um desvio injustificavelmente expressivo, onde as razões referidas anteriormente sobre a quebra da ISGD verificada nesta estação não são suficientes.

Posto isto, foi então realizado um estudo pormenorizado aos dados da EMA do PE do Funchal, onde foi possível verificar que, em agosto de 2010, houve a primeira quebra prolongada de funcionamento até outubro desse ano. Esta quebra de funcionamento foi provocada por um grande incêndio que destruiu mais de 90% do Parque Ecológico do Funchal e que poderá ter afetado o correto funcionamento do sensor. Separou-se então os registos da estação em dois diferentes períodos de análise, antes da falha de funcionamento e depois da falha, o que permitiu concluir que efetivamente existe um grande desvio em termos médios da ISGD medida, na fase negativa da declinação solar de 660 Wh.m².dia e na fase positiva de 1970 Wh.m².dia.

Assim, na figura 3.71 e no anexo A.3 é apresentado a análise da variação anual da ISGD das EMAs do concelho do Funchal, compreendendo os registos entre o primeiro mês completo do ano de 2006 e agosto de 2010.

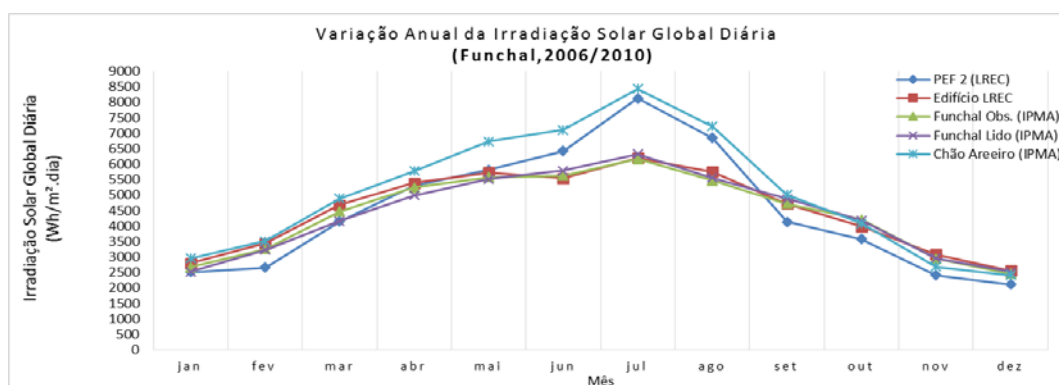


Figura 3.71 – Análise da variação anual da ISGD, entre 2006 e 2010, das EMAs do concelho do Funchal.

Esta análise permitiu concluir que, antes de agosto de 2010, a EMA do PE do Funchal, à cota dos 1300 m, apresentava um funcionamento concordante, não só com a influência morfológica da zona, como também, da declinação solar e da influência atmosférica, na incidência da radiação solar.

ANÁLISE DA ISGD NOS RESTANTES CONCELHOS

No anexo A.3 são apresentados os resultados desta comparação, para cada um dos restantes oito concelhos. Assim, importa referir para cada um desses concelhos as seguintes conclusões.

a) Concelho da Calheta

Neste concelho existem três EMAs, duas da rede LREC (**Prazeres e Pico Verde**) e uma da rede IPMA (**Ponta do Pargo**). Após a análise dos resultados, não foi detetada nenhuma inconformidade com o que já foi referido anteriormente acerca de cada uma. Embora a EMA dos Prazeres tenha apresentado uma falha de dados prolongada, entre os meses fevereiro a julho de 2015.

b) Concelho de Santa Cruz

Neste concelho existem atualmente três EMAs, duas da rede IPMA (**Aeroporto Sta. Catarina e Santo da Serra**) e uma da rede LREC (**Deserta Grande**). A EMA das Desertas esteve em funcionamento entre 2007 e 2011. Relativamente às outras duas EMAs, a EMA do Aeroporto Santa Catarina, iniciou o seu funcionamento em dezembro de 2014 pelo que é importante comparar a sua variação anual da ISGD com a da EMA do Santo da Serra, entre janeiro e agosto de 2015. Após a sua análise não foi encontrada nenhuma inconformidade com todas as explicações referidas anteriormente.

c) Concelho da Ponta do Sol

Neste concelho existem três EMAs, duas da rede IPMA (**Bica da Cana e Lugar de Baixo**) e uma da rede LREC (**Bica da Cana**). Após a análise dos resultados, não foi detetada nenhuma inconformidade perante o que já foi referido acerca de cada uma.

d) Concelho de Câmara de Lobos

Neste concelho existe apenas uma EMA, na freguesia da **Quinta Grande**, pertencente à rede IPMA. Foram comparados os valores da variação anual da ISGD com os da EMA do LREC e da EMA do Observatório. Após a análise dos resultados, não foi detetada nenhuma inconformidade perante tudo o que já foi referido acerca desta EMA.

e) Concelho do Porto Moniz

Neste concelho existem três EMAs, duas da rede IPMA (**Lombo da Terça e Porto Moniz**) e uma da rede LREC (**Porto Moniz**). Após a análise dos resultados, não foi detetada nenhuma inconformidade perante tudo o que já foi referido acerca de cada uma. Embora, a EMA da rede LREC tenha apresentado uma falha de dados prolongada, entre os meses de janeiro a maio de 2015.

f) Concelho de Santana

Neste concelho existem três EMAs, duas da rede IPMA (**São Jorge e Santana**) e uma da rede LREC (**Pico das Pedras**). Após a análise dos resultados, não foi detetada nenhuma inconformidade perante tudo o que já foi referido acerca de cada uma.

g) Concelho de Machico

Neste concelho existem duas EMAs, uma da rede IPMA (**Ponta de São Lourenço**) e uma da rede LREC (**Machico**). Aquando da análise dos resultados desta EMA, já havia sido detetada uma queda abrupta nos valores de ISGD, iniciada em fevereiro de 2014, originada pela danificação do fixador do sensor, reposto em abril de 2015, conforme é visível na figura 3.72.

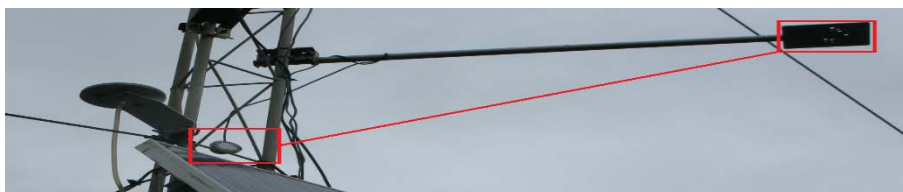


Figura 3.72 – Sensor de radiação desposicionado na EMA de Machico entre 02/2014 e 04/2015.

Por esse motivo os resultados apresentados por esta estação, entre janeiro e abril de 2015, apresentam um défice da ISGD. Relativamente aos restantes resultados, tanto para esta estação como para a estação da rede IPMA, não foram encontradas inconformidades com tudo o que já foi referido anteriormente acerca de cada uma delas.

h) Concelho de São Vicente

Neste concelho existem duas EMAs, uma da rede IPMA (São Vicente) e uma da rede LREC (Encumeada). Após a análise dos resultados, não foi detetada nenhuma inconformidade perante tudo o que já foi referido acerca de cada uma.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise comparativa, por concelho, entre as estações da rede LREC e as da rede IPMA permitiu retirar mais elações sobre a distribuição geográfica da irradiação solar global e validar os resultados apresentados por redes diferentes. Uma vez que dentro da rede IPMA existem três EMAs (Aeroporto Santa Catarina, Pico Alto e Porto Moniz) com um funcionamento de apenas 8 meses (entre janeiro a agosto de 2015), foi igualmente realizada uma análise, entre estações do mesmo concelho, de forma a averiguar se, o desvio da ISGD apresentado por estações próximas é sensivelmente constante ao longo do período em análise.

No concelho do Funchal, verificou-se a existência de duas EMAs, Trapiche e PE do Funchal, que apresentam uma variação anual da ISGD consideravelmente inferior à distribuição geográfica da radiação solar global expectável para estes dois locais. Embora as características morfológicas e atmosféricas, do concelho do Funchal, influenciem fortemente a incidência da radiação solar na superfície, as estações a cotas mais altas devem apresentar, na fase positiva da declinação solar, uma ISGD superior à apresentada por estações a cotas significativamente inferiores, o que efetivamente não acontece nestes dois casos.

Devido ao curto período de funcionamento da EMA do Trapiche, associado à elevada percentagem de lacunas de dias nos seus registos, superior a 35,5%, não foi possível realizar uma análise mais aprofundada a esta estação. Relativamente à EMA do PE do Funchal embora presente, de igual forma que a EMA do Trapiche, uma elevada percentagem (superior a 20%) de lacunas de dias nos registos, após uma análise mais pormenorizada aos seus registos permitiu concluir que o seu sensor de radiação apresenta uma anomalia, uma vez que a partir de outubro de 2010 existe uma quebra na quantificação da radiação solar global. A quebra apresentada é, em média, de 659 Wh/m².dia, na fase negativa da declinação solar, e de 1974 Wh/m².dia, na fase negativa da declinação solar.

Nos restantes concelhos, não foi detetada nenhuma estação que apresentasse uma variação anual da ISGD incompreensivelmente distinta, da distribuição geográfica da radiação solar global.

A ausência de análise e tratamento dos registos da rede LREC é uma das causas da elevada percentagem de lacunas de dias nos registos desta rede. Entre 2013 e 2015, muitas foram as estações que, devido à ausência de tráfego de dados, não estiveram operacionais, este foi outro fator que contribuiu para a elevada percentagem de lacunas de dias. Entre janeiro de 2014 e abril de 2015, os registos da EMA de Machico foram desconsiderados pelo facto de o sensor ter estado, neste período, solto e em posição incorreta.

3.5 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS REGISTOS DAS EMAS E A BASE DE DADOS DO PVGIS

3.5.1 METODOLOGIA DA BASE DE DADOS DA FERRAMENTA PVGIS

Existem diversas bases de dados de radiação solar que permitem obter a variação anual da ISGD para um ponto específico. Assim, selecionou-se a base de dados PVGIS para realizar uma análise comparativa com os registos obtidos pelas duas redes de EMAs existentes no arquipélago da Madeira.

O Sistema de Informação Geográfica Fotovoltaica (PVGIS), desenvolvido pelo *Institute for Energy and Transport* (IET) um dos Institutos Científicos do *Joint Research Centre* da Comissão Europeia, é um instrumento de avaliação geográfica dos recursos de energia solar no contexto de gestão integrada da geração distribuída de energia para o Continente Europeu, África e Sudoeste Asiático. Esta ferramenta incorpora uma base de dados de radiação solar global, desenvolvida a partir de dados climatológicos homogeneizados para a Europa e disponíveis no *Atlas Europeu da Radiação Solar* (ESRA). Por sua vez os dados incluídos no ESRA dizem respeito a medições de diversas estações terrestres das quais apenas uma mínima parte inclui informação além das já referidas e pouco fiáveis medidas de horas de sol: oitenta estações com somas diárias de componente global e horas de sol; seis estações com somas horárias de componente global, difusa e horas de sol; uma estação com somas de meia hora das três componentes da radiação solar e horas de sol e, seiscentas e noventa e uma estações com apenas somas diárias de sol. O modelo de radiação solar utilizado na construção do PVGIS, foi o *r.sun* e as técnicas de interpolação *s.vol.rst para superfície horizontal* e *s.surf.rst para superfícies inclinadas*. Este modelo baseou-se no modelo utilizado na construção do ESRA, ou seja, um modelo de céu limpo que faz uso do fator de turbidez de linke para uma massa de ar dois e que recupera a irradiação global de satélites para calcular a radiação direta, difusa e global, utilizando o método

Heliosat (European Commission, 2006). Após o cálculo das variáveis todas, foi implementado num *software* de sistemas de informação geográfica.

No entanto, a base de dados do PVGIS pode também apresentar problemas relacionados com as medições terrestres e com a obtenção de dados a partir das imagens de satélites (Amillo, 2013). Relativamente, aos problemas provenientes das medições terrestres, são de destacar os seguintes:

- A inexistência de uma distribuição espacial heterogénea das estações meteorológicas terrestres em áreas com relevos acentuados impossibilita a correta normalização dos dados provenientes do modelo de céu limpo. Esta base de dados só utilizou dados relativos a uma única estação na ilha da Madeira, dados relativos à zona do Observatório no Funchal, no entanto, não foi possível verificar qual a variável utilizada, se apenas o número de horas solar ou a radiação solar global;
- A interpolação não é viável quando a densidade de estações terrestres é baixa;
- Geralmente, só a radiação solar global é medida pelas estações terrestres, faltando a quantificação das restantes componentes (direta e difusa);
- Inexistência de controlo de qualidade dos dados, procedimentos de medição e manutenção dos instrumentos.
- No que diz respeito aos problemas que poderão estar associados à obtenção dos dados derivados de imagens de satélite, são de destacar os seguintes:
 - Os algoritmos apresentam problemas em zonas cobertas por neve ou em áreas com o solo claro/brilhante;
 - Inexistência de dados suficientes para validar o modelo, em algumas regiões climáticas.

3.5.2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

No anexo A.3 são apresentados os resultados da comparação realizada, por concelho, entre os registos das duas redes de EMAs e, os valores correspondentes à sua localização na base de dados do PVGIS. Esta comparação permitirá avaliar a variação anual da ISGD entre os registos das estações terrestres e os correspondentes na base de dados do PVGIS. Assim, a partir da localização das estações meteorológicas das duas redes, tabela 3.5 e tabela 3.10, foi possível retirar as médias mensais de longo prazo, correspondentes na base de dados PVGIS. Na tabela 3.15 é apresentado a variação anual da ISGD das EMAs LREC na base de dados PVGIS e, na tabela 3.16 das EMAs IPMA.

Tabela 3.15 – Variação anual da ISGD das EMAs LREC na base de dados PVGIS.

	Porto Moniz	Machico	Pico das Pedras	Encumeada	Bica da Cana	Pico Verde	Prazeres	P.E. Funchal	Trapiche	LREC	Desertas
jan	2410	2680	2450	2730	2900	2800	2940	2620	2960	2940	2680
fev	2940	3490	2870	3440	3630	3470	3700	3290	3840	3750	3330
mar	4360	5190	4200	4740	5050	4920	5160	4690	5370	5290	4850
abr	5280	6160	4830	5480	5850	5770	6210	5300	6140	6000	5790
mai	5540	6580	5140	5910	6430	6280	6650	5710	6670	6520	6140
jun	6240	7130	5940	6670	7320	7170	7370	6210	7180	7030	6400
jul	6760	7520	6570	7210	7790	7480	7460	6600	7360	7240	6570
ago	6340	6780	5940	6550	7060	6780	6840	6000	6730	6680	6250
set	4880	5510	4300	4820	5170	5150	5580	4760	5530	5460	5200
out	3600	4340	3460	3860	4120	4000	4390	3900	4540	4520	4190
nov	2320	2900	2240	2760	2960	2920	3160	2690	3250	3230	2890
dez	2110	2400	2040	2300	2470	2350	2560	2290	2650	2660	2460
Média	4410	5060	4170	4710	5070	4930	5180	4510	5190	5120	4740

Tabela 3.16 - Variação anual da ISGD das EMAs IPMA na base de dados PVGIS.

	Obs.	Lido	Pico Alto	Chão Areeiro	Lugar de Baixo	Quinta Grande	Ponta do Pargo	Lombo da Terça	Bica da Cana	Porto Moniz	São Vicente	São Jorge	Santana	Santo da Serra	Pta. São Lourenço	Aero. Sta. Catarina
jan	2880	2920	2690	2860	2830	2880	2620	2750	2900	2400	2660	2640	2610	2760	2700	2800
fev	3650	3730	3340	3590	3640	3710	3180	3380	3630	3000	3280	3120	3100	3380	3360	3490
mar	5250	5280	4770	4980	5160	5290	4470	4890	5030	4340	4650	4480	4430	4940	4960	5090
abr	5860	6010	5330	5650	6120	6190	5670	5880	5830	5260	5280	5380	5300	5730	5960	5910
mai	6290	6510	5730	6060	6610	6710	6190	6470	6420	5510	5930	5620	5510	6090	6310	6250
jun	6840	7020	6240	6550	7190	7240	6780	7300	7310	6210	6710	5780	5680	6710	6780	6840
jul	7040	7220	6630	6890	7290	7390	6990	7720	7790	6720	7160	6140	6070	7380	7040	7260
ago	6480	6680	6030	6260	6770	6770	6610	7040	7050	6290	6470	5750	5640	6670	6510	6570
set	5340	5470	4790	5050	5540	5510	5000	5280	5170	4840	4940	4750	4650	5230	5420	5380
out	4470	4500	3940	4110	4400	4340	3720	3910	4100	3600	3730	3930	3870	4240	4260	4330
nov	3160	3190	2760	2890	3040	3110	2720	2760	2950	2320	2510	2590	2570	2920	2870	2950
dez	2630	2630	2370	2480	2510	2570	2340	2360	2460	2070	2250	2400	2370	2500	2470	2560
Média	5000	5100	4560	4790	5100	5150	4700	4990	5060	4390	4640	4390	4320	4890	4900	4960

Esta análise comparativa compreendeu, o cálculo do desvio entre a média anual da ISGD, das EMAs, das duas redes e, da correspondente na base de dados do PVGIS. Os resultados desta análise são apresentados na tabela 3.17 e tabela 3.18, respetivamente, para a rede de EMAs LREC e para a rede de EMAs IPMA.

Tabela 3.17 – Análise comparativa entre a média anual da ISGD das EMAs LREC e do PVGIS.

Nome da EMA (Rede LREC)	Localização (concelho)	Altitude/Cota (m)	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD "PVGIS" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
Edifício LREC	Funchal	250	4598	5120	-522
Trapiche		590	3663	5190	-1527
P.E. Funchal		1300	3980	4510	-530
Bica da Cana	Ponta do Sol	1600	5099	5070	29
Deserta Grande	Santa Cruz	10	3860	4740	-880
Encumeada	São Vicente	1017	3829	4710	-881
Machico	Machico	170	4290	5060	-770
Pico das Pedras	Santana	920	3722	4170	-448
Porto Moniz	Porto Moniz	675	3610	4410	-800
Prazeres	Calheta	648	4285	5180	-895
Pico Verde		1020	5035	4930	105

Tabela 3.18 - Análise comparativa entre a média anual da ISGD das EMAs IPMA e do PVGIS.

Nome da EMA (Rede LREC)	Localização (concelho)	Altitude/Cota (m)	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD "PVGIS" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
Observatório	Funchal	58	4462	5000	-538
Lido		25	4496	5100	-604
Pico Alto		1112		4560	
Chão Areeiro	Ponta do Sol	1590	4976	4790	186
Lugar de Baixo		42	4752	5100	-348
Bica da Cana		1580	3847	5060	-1213
Quinta Grande	Camara de Lobos	458	3654	5150	-1496
Aero. Sta. Catarina	Santa Cruz	58		4960	
Santo da Serra		690	3121	4890	-1769
Pta. São Lourenço	Machico	133	4493	4900	-407
Ponta do Pargo	Calheta	278	4964	4700	264
Porto Moniz	Porto Moniz	35		4390	
Lombo da Terça		934	4057	4990	-933
São Vicente		110	3613	4640	-1027
São Jorge	Santana	258	4079	4390	-311
Santana		409	3413	4320	-907
Aero. Porto Santo	Porto Santo	78	4895	5230	-335

Após analisar a variação anual da ISGD correspondente a estas estações no anexo A.3, como também, a comparação entre a média anual da ISGD das EMAs e do PVGIS, apresentado na tabela 3.17 e tabela 3.18, não esquecendo o enquadramento geográfico das mesmas, figura 3.68, podemos apontar as seguintes considerações:

- a) Na tabela 3.19 são apresentadas as principais características das estações meteorológicas que apresentaram uma média anual da ISGD menor que a atribuída pela base de dados do PVGIS para o local, com um desvio superior a 1000 Wh/m².dia.

Tabela 3.19 - EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD inferior à correspondente no PVGIS para o local, com desvio superior a 1000 Wh/m².dia.

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD "PVGIS" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
São Vicente	IPMA	SP Lite 2	5	0,0%	< a 2% ao ano	3613	4640	-1027
Trapiche	LREC	SP Lite	4	35,5%	< a 2% ao ano	3663	5190	-1527
Bica da Cana	IPMA	EP08	6	0,0%	< a 2% ao ano	3847	5060	-1213
Quinta Grande	IPMA	EP08	5	0,0%	< a 2% ao ano	3654	5150	-1496
Santo da Serra	IPMA	EP08	5	2,8%	< a 2% ao ano	3121	4890	-1769

Existem duas razões que ajudam a compreender os desvios apresentados por estas estações, a primeira está associada à incerteza dos valores do PVGIS e, a segunda à incerteza dos valores das estações meteorológicas.

A incerteza associada aos valores do PVGIS é originada pelo procedimento de validação dos resultados da ISGD obtidos a partir do modelo de céu limpo, que posteriormente necessitam de ser normalizados e, em áreas com relevos acentuados, é necessário uma distribuição espacial heterogénea. No entanto, a base de dados do PVGIS, apenas utilizou os registos de uma única estação, localizada no centro do Funchal, para normalizar os seus resultados, para todo o arquipélago. Este procedimento afetou consideravelmente algumas áreas pois foram sobrevalorizadas pela base de dados do PVGIS tendo em conta as suas características morfológicas. As EMAs, do Santo da Serra, da Bica da Cana (IPMA), da Quinta Grande e de São Vicente estão localizadas em algumas dessas áreas, razão pela qual, o desvio apresentado foi mais expressivo. A **EMA do Santo da Serra** localiza-se numa zona com um microclima húmido, originado pelo relevo das montanhas (este, sul e oeste) circundantes e pela nebulosidade proveniente de norte que afetam a incidência da radiação solar. A **EMA da Bica da Cana (IPMA)** localiza-se numa zona que é rodeada, de este a sudeste por uma elevação rochosa, com aproximadamente 20 metros. A **EMA da Quinta Grande** localiza-se no interior de um vale em "V", com orientação norte/su-sudoeste, com as linhas de cumeada, à cota dos 600 m. A **EMA de São Vicente** localiza-se no interior de um vale, no lado norte da ilha, com orientação sudeste/noroeste, formado pelo maciço central (acima dos 1000 m) de este a oeste.

Relativamente à incerteza associada aos valores das estações meteorológicas, esta é originada pela elevada percentagem de lacunas de dias e, pela ausência de manutenção nos sensores de radiação solar que traduz-se numa quebra gradual da sua sensibilidade. Esta incerteza está associada ao desvio apresentado pela EMA do Trapiche pois esta estação apresenta mais de 35,5% de lacunas de dias, no seu ainda curto período de tempo de funcionamento. Outro fator que afeta esta incerteza é a inexistência de manutenção dos sensores de radiação solar pois existe uma quebra gradual da sua sensibilidade, inferior a 2% ao ano.

- b) Na tabela 3.20 são apresentadas as principais características das estações meteorológicas que apresentaram uma média anual da ISGD menor que a atribuída pela base de dados do PVGIS para o local, com um desvio inferior a 500 Wh/m².dia.

Tabela 3.20 - EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD inferior à correspondente no PVGIS para o local, com desvio inferior a 500 Wh/m².dia.

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD "PVGIS" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
Bica da Cana	LREC	SP Lite	10	9,1%	< a 2% ao ano	5099	5070	29
Pico Verde	LREC	SP Lite	10	10,2%	< a 2% ao ano	4285	5180	105
Ponta do Pargo	IPMA	CM11	9	3,9%	< a 5%	4964	4700	264
Chão Areeiro	IPMA	CM12	12	9,4%	< a 5%	4976	4790	186

A incerteza associada aos valores da ISGD da base de dados do PVGIS e a incerteza associada aos registos das estações meteorológicas são inerentes a todas estações. No entanto, as características geográficas das estações justificam os bons resultados apresentados. As EMAs, do Chão do Areeiro, Pico Verde e Bica da Cana localizam-se acima dos 1000 m, as duas primeiras, no lado sul da ilha da Madeira, e a terceira na extremidade do planalto do Paúl da Serra para o lado norte. A EMA da Ponta do Pargo, à cota do 300 m, na ponta mais ocidental da ilha, atribui-lhe características excelentes de exposição solar. As características geográficas destas quatro estações são a principal justificação, para os bons resultados apresentados, muito embora a sua percentagem de lacunas de dias e a inexistência de manutenção/recalibração dos sensores, possa influenciar os seus registos.

- c) Na tabela 3.21 são apresentadas as estações meteorológicas que apresentam uma média anual da ISGD maior que a atribuída pela base de dados do PVGIS para o local, com um desvio inferior a 1000 Wh/m².dia.

Tabela 3.21 – EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD, superior à correspondente no PVGIS para o local, com desvio inferior a 1000 Wh/m².dia.

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD "PVGIS" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
Santana	IPMA	SP Lite 2	5	0,0%	< a 2% ao ano	3413	4320	-907
Desertas	LREC	SP Lite	10	1,3%		3860	4740	-880
Machico			7	11,5%		4290	5060	-770
Pico das Pedras			6	15,7%		3722	4170	-448
P.E.Funchal			9	20,9%		3980	4510	-530
P.E.Funchal 2			5	1,6%		4506	4510	-4
Porto Moniz			10	22,4%		3610	4410	-800
Prazeres			5	42,7%		4285	5180	-895
Pta. São Lourenço	IPMA	CM 11	6	1,2%	< a 5% ao fim destes anos de funcionamento	4493	4900	-407
Lugar de Baixo			13	6,9%		4752	5100	-348
São Jorge			14	7,6%		4079	4390	-311
Aero. Porto Santo			12	8,2%		4895	5230	-335
Lombo da Terça			6	9,5%		4057	4990	-933
Observatório			13	9,6%	Recalibrado	4462	5000	-538
Lido	IPMA	EP08	12	6,4%	< a 2% ao ano	4496	5100	-604
LREC	LREC	CM3	10	3,4%		4598	5120	-522
Encumeada			10	5,4%		3829	4710	-881

A incerteza associada aos valores da ISGD da base de dados do PVGIS e a incerteza associada aos registos das estações meteorológicas são inerentes a todas estações. A incerteza associada aos valores da ISGD da base de dados do PVGIS é a principal justificação dos desvios apresentados, no entanto estes são mais ou menos atenuados pelas características geográficas e morfológicas das áreas de instalação das estações que se traduz

num maior ou menor desvio. As EMAs, de São Jorge, do Lugar de Baixo, da Ponta de São Lourenço e do Aeroporto do Porto Santo, são estações em que a sua localização geográfica e enquadramento morfológico traduz-se numa boa exposição solar apresentando os desvios mais pequenos de entre as dezassete estações que apresentaram um desvio inferior a $1000 \text{ Wh/m}^2\text{.dia}$. Por outro lado, dado o procedimento de normalização dos valores da base dados do PVGIS para o lado norte da ilha utilizar os registos de uma estação no lado sul, existe uma sobrevalorização nesta área, como é o caso da EMA de Santana, Lombo da Terça, do Porto Moniz e da Encumeada em que apresentam um maior desvio.

No que diz respeito à incerteza associada aos registos das estações meteorológicas, existem algumas estações que apresentam uma elevada percentagem de lacunas de dias e, associado à inexistência de manutenção/recalibração dos sensores, está igualmente associado a um maior ou menor desvio apresentado. De destacar as EMAs, do PE do Funchal, dos Prazeres e do Porto Moniz que apresentam uma percentagem de lacunas de dias superior a 20%, que associado ao facto que nenhum dos sensores de radiação solar serem recalibrados, representando uma quebra anual inferior a 2%, justificando os desvios apresentados.

Na tabela 3.21 também está incluída uma nova estação, PE do Funchal 2, esta estação representa a média anual que a EMA do PE do Funchal apresentava antes do incêndio de 2010, pelo que é possível verificar que apresenta um valor próximo do atribuído pela base de dados do PVGIS e que, dadas as características geográficas, à cota dos 1300 m, e morfológicas do local de instalação é mais aceitável.

3.5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A realização deste estudo comparativo, por concelho, entre a variação anual da ISGD das EMAs da rede LREC e da rede IPMA, e os correspondentes à sua localização na base de dados do PVGIS, permitiu confrontar os registos apresentados pelas EMAs com os previstos a partir de um modelo de céu limpo normalizado por interpolação dos registos de uma estação meteorológica local localizada no Funchal e assim proceder a uma validação parcial dos registos apresentados pelas EMAs.

A ambas as partes estão associadas a incertezas nos registos. A incerteza associada aos registos das EMAs é proveniente da elevada percentagem de lacunas de dias e da inexistência de manutenção nos sensores de radiação solar. Relativamente à incerteza associada aos dados provenientes da base de dados do PVGIS, esta deve-se ao facto de que, no procedimento de normalização dos resultados da ISGD, para todo o arquipélago provenientes do modelo de céu-limpo apenas serem utilizados os registos de uma única estação meteorológica local. Áreas com declives acentuados é necessário um maior número de estações meteorológicas distribuídas de forma espacial heterogénea para que sejam obtidos bons resultados absolutos.

Tendo em consideração tudo o que já foi concluído acerca dos registos das EMAs, das duas redes locais, no capítulo 3.4.2 relativamente às EMAs da rede LREC, no capítulo 3.4.5 relativamente às EMAs da rede-IPMA, e no capítulo 3.4.6 relativamente ao estudo comparativo entre ambas as estações, por concelho, podemos

concluir o seguinte acerca dos registos das EMAs, após este estudo comparativo, com os dados provenientes da base de dados do PVGIS.

A maioria das EMAs apresentam desvios consideráveis relativamente aos valores apresentados pela base de dados do PVGIS justificado pela incerteza associada aos dados da ISGD apresentados pela base de dados do PVGIS. Como já foi referido anteriormente, a metodologia utilizada pela base de dados do PVGIS, para a obtenção da ISGD, para todo o arquipélago da Madeira é “débil”, traduzindo-se em desvios significativos quando as EMAs a analisar encontram-se localizadas em locais que geograficamente e morfologicamente são afetados pela baixa penetração da radiação solar. Podemos então concluir que os valores apresentados, na base de dados do PVGIS, estão significativamente “sobrevvalorizados”.

Das EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD inferior à atribuída pela base de dados do PVGIS ao local, com um desvio superior a $1000 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, a EMA do Trapiche é a única que apresenta uma média anual da ISGD diferente da distribuição geográfica da radiação solar global expectável para o local. Como já foi referido anteriormente, esta estação apresenta um curto período de funcionamento que, associado à elevada percentagem de lacunas de dias nos registos, não permite uma análise mais pormenorizada com o objetivo de um aprofundamento da disponibilidade real da radiação solar global, neste local. As restantes quatro estações, Santo da Serra, Bica da Cana, Quinta Grande e São Vicente são caracterizadas pela morfologia distinta, que influencia a penetração da radiação solar, nos locais.

Das EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD menor que a atribuída pela base de dados do PVGIS ao local, com um desvio inferior a $1000 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, a influência conjunta da incerteza associada aos registos das EMAs e aos dados provenientes da base de dados do PVGIS não permite uma análise precisa dos resultados, embora seja de destacar a EMA do PE do Funchal, a estação à cota mais alta de entre as que apresentaram um desvio enquadrado neste intervalo. Foi igualmente incluído neste estudo comparativo a média anual da ISGD, apresentada por esta EMA antes de agosto de 2010, de forma a estudar esta estação com valores mais realistas. O desvio apresentado foi ainda assim negativo, mas muito próximo do apontado pela base de dados do PVGIS para o local, dando mais peso ao incorreto funcionamento do sensor de radiação da estação.

As EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD maior que a atribuída pela base de dados PVGIS para o local, com um desvio inferior a $500 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, foram: a Bica da Cana (LREC), o Pico Verde, o Chão do Areeiro e a Ponta do Pargo. As três primeiras situam-se a cotas superior aos 1000 m e a última à cota do 300 m, na ponta mais ocidental da ilha, com características excelentes de exposição solar. As características morfológicas e geográficas destas quatro estações são a principal justificação para os resultados apresentados, muito embora a percentagem de lacunas de dias e a inexistência de manutenção/recalibração dos sensores, influencie os seus registos.

Em suma, este estudo comparativo entre a média anual da ISGD, das estações meteorológicas locais e a correspondente na base de dados do PVGIS, é caracterizado pela influência da incerteza existente nos dados

de ambas as partes. A incerteza associada aos registos das estações meteorológicas está diretamente relacionada com a percentagem de lacunas de dias nos registos e com falta de manutenção, nos sensores de radiação solar, que provoca uma quebra gradual da sua sensibilidade consoante o modelo. Por outro lado, a incerteza associada à base de dados do PVGIS, é originada pela utilização dos registos de apenas uma estação meteorológica, num procedimento de normalização onde se impunha a utilização de uma rede de estações meteorológicas distribuídas de forma espacial heterogénea, para a obtenção de bons resultados absolutos.

3.6 ESTUDO COMPARATIVO RELATIVAMENTE AO *ATLAS DA RADIAÇÃO SOLAR*

3.6.1 METODOLOGIA DO *ATLAS DA RADIAÇÃO SOLAR*

Esta descrição da metodologia assentou no fundamento apresentado no relatório elaborado pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade de Vigo no âmbito do *Estudo e apoio científico no domínio da radiação solar* apresentado ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) dentro do *Projeto PAUER - Projeto de Avaliação e Utilização de Energias Renováveis* (Vázquez et al., 2007a).

Para a elaboração do *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira* foi previamente realizada uma pesquisa do estado da arte, sobre as necessidades inerentes à implementação do método Heliosat-2, método comumente utilizado nos anos precedentes ao início da elaboração deste *Atlas da Radiação Solar*. Verificou-se que para regiões, com uma diversidade climática, não só em altitude mas também consoante a posição geográfica, devido à existência de declives acentuados e abruptos, a inexistência de uma rede completa de estações radiométricas capaz de ser conjugada com imagens da área em estudo fornecidas por satélites meteorológicos da faixa do visível do espectro solar, poderia ser utilizada só esta última restrição para estimar a radiação solar e assim elaborar o *Atlas da Radiação Solar* (Vázquez, Izquierdo, Santos, Prado, & Esteves, 2007b).

As imagens provenientes dos satélites vieram então permitir um estudo não só meteorológico com maior precisão e consequente a elaboração de mapas com maior detalhe e diversidade que, só com dados provenientes das estações meteorológicas terrestres não era possível, no entanto, a utilidade da base de dados destas estações nunca foi posta em causa devido à necessidade de validação/calibração da informação transmitida pelas imagens.

O satélite geostacionário, utilizado neste estudo foi o Meteosat-6 da organização EUMETSAT, que estava localizado sobre o Equador a 0° longitude, de janeiro de 2002 até abril de 2003, passando para 10° de longitude Leste até setembro de 2005, o que dificultou a posterior análise das imagens recolhidas. As imagens fornecidas pelo satélite cobriam as áreas do oceano Atlântico, norte de África, Europa e Médio Oriente, conforme é visível na figura 3.73.



Figura 3.73 – Área da Terra coberta pelo satélite Meteosat-6 nas imagens em modo Full Rapid Scan Service. Adaptado: (Vázquez et al., 2007a).

As imagens de satélite são compostas por *píxeis* (pix) e, a cada imagem está associado o valor instantâneo da radiação solar global horizontal. A “resolução” das imagens, em termos de *píxeis*, é descrita como sendo o conjunto de dois números inteiros positivos, sendo que o primeiro número refere-se à quantidade de colunas (largura) de *píxeis* e o segundo ao número de linhas (altura) de pix. Assim, a informação contida na imagem dá um número na escala cinza (0 a 255) de cada *pixel* de forma a ser relacionado com a nebulosidade sobre o local em estudo.

As imagens recebidas tiveram de ser recordadas para restringirem-se à área de análise, neste caso ao arquipélago da Madeira, ficando aproximadamente com uma resolução de 2706 pix (41 linhas por 66 colunas), coincidindo geograficamente com a área compreendida entre 32°15’- 33°15’ de latitude norte e 16°15’- 17°30’ de longitude oeste.

Na figura 3.74, está representada a malha de *píxeis* de cada recorte, no entanto, estes recortes em separado, não foram utilizados porque o número de *píxeis*, em terra, em que cada um deles era muito pequeno, não permitiram efetuar interpolações, nem garantir a mínima fiabilidade. A ilha da Madeira apresentava em terra 131 pix, a ilha do Porto Santo 11 pix e as Ilhas Desertas 10 pix, com a malha a 0° de longitude e, com a malha, na posição 10° de longitude, a ilha da Madeira apresentava 116 pix, o Porto Santo 12 pix e as Desertas 11 pix.

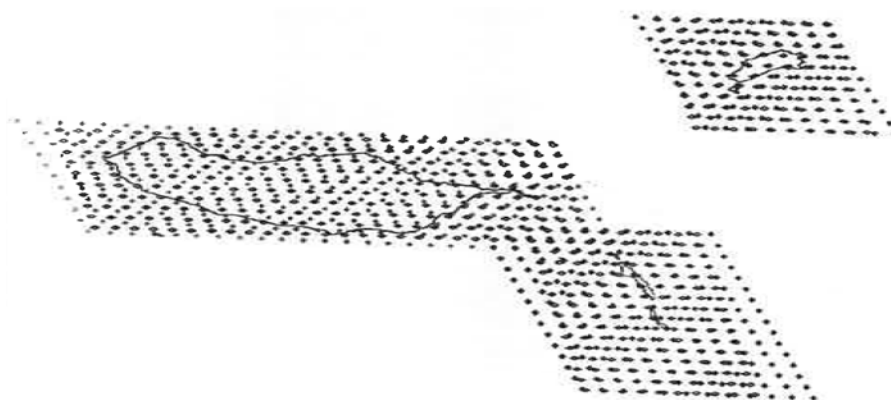


Figura 3.74 – Malha de *píxeis* dos três cortes parciais a 0° de longitude e a 10° de longitude Este. Adaptado: (Vázquez et al., 2007a).

O satélite Meteosat-6 neste período, como já foi referido anteriormente, funcionou em modo *Full Rapid Scan Service* que lhe permitia efetuar um scan (imagem) a cada 10 minutos e, a cada 30 minutos enviar a *slot* correspondente, conjunto de 3 imagens, para arquivar. Sendo que o período de coleta de imagens decorreu, entre janeiro de 2002 a dezembro de 2005, em termos de imagens e *slot's* corresponderia a um total de 18264 imagens ou 6088 *slot's*, ou seja, 144 imagens diárias para analisar. Estes valores eram considerados

exorbitantes, em termos de espaço ocupado, tempo de *download* das imagens, tempo de análise e processamento. Embora o número apresentado incluía as imagens captadas, no período noturno, o que neste caso não são relevantes, ainda assim, a quantidade de informação a analisar era preocupante.

Segundo a experiência dos autores, num outro trabalho similar recente, encontraram um número mínimo de *slot's* imprescindível à realização de um estudo de forma a garantir um erro aceitável e dissipar assim, os problemas associados à utilização de grandes quantidades de imagens (Vázquez, Santos Navarro, Prado Cerqueira, Vázquez Ríos, & Rodrigues Fernandes, 2005). O número mínimo encontrado foi de apenas 5 *slot's*, ou seja, quinze imagens diárias, pelo que foram escolhidas para a realização deste trabalho as *slot's* que em termos de horário solar, precedesse as 8:00, 10:00, 12:00, 14:00 e 16:00.

Após a seleção, aquisição e primeira análise das imagens, o método Heliosat-2 necessitava de outros parâmetros para efetuar o cálculo, eram eles: o *fator de turbidez de Linke* para uma massa de ar de 2 e, a elevação do local, ao qual os dados referentes ao primeiro parâmetro foram obtidos por solicitação ao Instituto do Ambiente e Sustentabilidade (IES) e os dados referentes ao segundo parâmetro através da base de dados da *Global Land One - Km Base Elevation* (GLOBE). A elevação de cada *pix* da imagem foi calculada através, da média dos pontos da base de dados da GLOBE, incluídas na sua área de cobertura.

Para a implementação do método Heliosat-2 nas imagens de satélite foi necessário utilizar um programa elaborado na linguagem C++ para estimar nos locais correspondentes aos *píxeis* das imagens, para os instantes em que elas foram captadas, o valor da irradiância solar global horizontal. Este programa já tinha sido desenvolvido e aplicado na recente elaboração do *Atlas da Radiação Solar de Galícia*, por parte dos autores.

Após a integração das quinze imagens diárias, durante quatro anos, foi possível calcular um primeiro rascunho das médias das irradiações globais diárias mensais, para cada *pixel* da região, que ainda necessita de ser validado/calibrado com dados provenientes de medições efetuadas em terra. A validação dos valores estimados, através da utilização do método Heliosat-2 é crucial, visto que, este método, por si só, não produz resultados considerados bons, em termos absolutos. Assim, é necessário integrar nestes, os valores obtidos pelas estações meteorológicas da região e assim converter, os bons dados relativos, em bons dados absolutos. O processo consiste em atribuir os dados provenientes da estação, ao *pixel* mais próximo correspondente, sobre a obtenção de um coeficiente, dividindo o valor da estação terrestre pelo valor não-normalizado do *pixel* e, depois, multiplicando os valores não calibrados dos *píxeis* com características climáticas semelhantes adjacentes, pelo coeficiente, de forma a obter-se os valores absolutos (Lefèvre, Albuissou, & Wald, 2004).

Para realizar o procedimento de validação dos valores da irradiação, obtidos através das imagens e associados ao fator de turbidez de linke e elevação do local através do método Heliosat-2, foram utilizadas a variação anual da ISGD (2002-2005), tabela 3.22, medidas nas seis estações meteorológicas terrestres, operadas pelo

Instituto de Meteorologia Português da Região Autónoma da Madeira. Cinco das estações localizavam-se, na ilha da Madeira e a restante na ilha do Porto Santo, conforme a tabela 3.23.

Tabela 3.22 – Variação anual da ISGD das estações utilizadas na normalização do Atlas da Radiação Solar.

2002/05	Areeiro	Funchal	Lugar de Baixo	Ponta do Pargo	São Jorge	Porto Santo
jan	3146	2846	2775	2754	2392	2734
fev	3194	3419	3474	3469	2982	3632
mar	4495	4643	4628	4428	4041	5019
abr	5130	4683	5044	5577	4893	6155
mai	6637	5691	6144	6765	5553	7306
jun	7470	5601	6136	7285	6175	7095
jul	8023	5614	6024	7232	5770	7075
ago	6402	5496	5960	6496	6016	6545
set	5232	5043	5217	5155	4891	5534
out	3790	3691	3879	3862	3617	4056
nov	2517	2865	2922	2753	2339	3123
dez	2305	2481	2568	2547	1972	2511
Média	4875	4345	4570	4868	4226	5072

Tabela 3.23 – Estações meteorológicas do IPMA utilizadas na elaboração do Atlas da Radiação Solar.

Estação	Latitude (Norte)	Longitude (Oeste)	Altitude (m)
Areeiro	32° 43' 15"	16° 54' 49"	1510
Funchal	32° 38' 46"	16° 53' 27"	58
Lugar de Baixo	32° 40' 47"	17° 05' 28"	48
Ponta do Pargo	32° 48' 44"	16° 53' 27"	312
São Jorge	32° 49' 54"	16° 54' 24"	271
Porto Santo	33° 04' 23"	16° 20' 50"	82

Dada a escassez de estações foi necessário dividir o arquipélago em zonas, conforme a figura 3.75. Os critérios aplicados foram os seguintes:

Zona I – Píxeis localizados na Ilha do Porto Santo, foram normalizados a partir dos registos da estação do Porto Santo;

Zona II – Píxeis localizados no interior da ilha, foram normalizados a partir dos registos da estação do Areeiro;

Zona III – Píxeis localizados na costa sul e oceano próximo, foram normalizados a partir dos registos da estação do Funchal e do Lugar de Baixo;

Zona IV – Píxeis localizados na costa oeste e oceano próximo, foram normalizados a partir dos registos da estação do Lugar de Baixo e da Ponta do Pargo;

Zona V – Píxeis localizados na costa norte e oceano próximo, foram normalizados a partir dos registos da estação da Ponta do Pargo e de São Jorge;

Zona VI – Píxeis localizados na costa este e oceano próximo, foram normalizados a partir dos registos da estação de São Jorge e do Funchal;

Zona VII, VIII, IX – Píxeis localizados na zona de transição entre o interior e a costa este foram normalizados a partir dos registos da estação do Areeiro e da estação mais próxima, segundo a vertente da montanha;

Zona X – Píxeis localizados nas Ilhas Desertas e no oceano circundante, foram normalizados a partir dos registos das estações do Funchal, São Jorge e Faial.

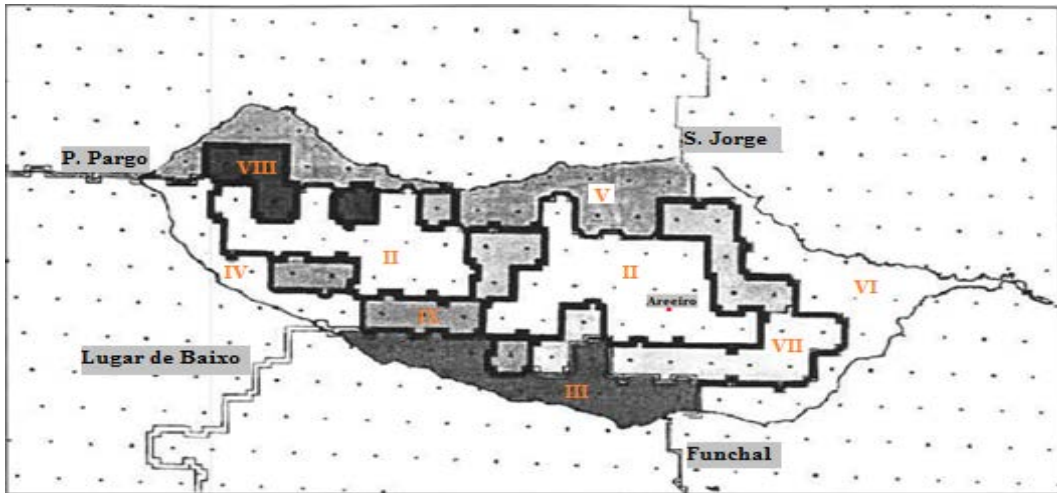


Figura 3.75 - Zonas geográficas onde o arquipélago da Madeira foi dividido no processo de validação da irradiação. Adaptado: (Vázquez et al., 2007a).

Estas zonas eram delimitadas pelo par vizinho de estações e foram utilizadas para a normalização, ponderando os seus valores na interpolação, com uma função do inverso da distância quadrática.

Relativamente aos dados geográficos como: os limites geográficos dos concelhos, a localização das principais cidades e montanhas, necessários para a elaboração dos mapas, através da sua implementação, no *software* ArcGis, estes foram fornecidos pelo Instituto do Meio Ambiente de Portugal. Após a validação dos valores são obtidos como resultado, em cada píxel, doze valores médios de ISGD onde, a cada um, corresponde um mês do ano e, a partir deles é calculada a média anual preenchendo assim a base de dados, com treze valores, em cada píxel da região. A base de dados criada é inserida no *software* de georreferenciação ArcGis para posteriormente, através da técnica de ponderação inversa da distância, serem criados os doze mapas mensais da ISGD e o mapa da média anual da ISGD, visível na figura 3.76 (Vázquez, Belmonte, Navarro, Cerqueira, & Esteves, 2008; Vázquez et al., 2007b).

3.6.2 METODOLOGIA UTILIZADA NESTE ESTUDO COMPARATIVO

Na figura 3.76 estão também localizadas as EMAs do IPMA e do LREC para permitir a realização de uma análise comparativa entre, os valores da ISGD apresentados no *Atlas da Radiação Solar*, e, os valores elaborados a partir da base de dados do LREC e da base de dados do IPMA. Para localizar as EMAs do IPMA e do LREC, na imagem do *Atlas da Radiação Solar*, foi realizada uma georreferenciação da mesma no ArcGis, com recurso à carta administrativa oficial de Portugal (CAOP2015) do arquipélago da Madeira, e, uma posterior projeção do ficheiro *kmz*, com a localização das EMAs efetuado no Google Earth, para o mesmo sistema de coordenadas definido no início da georreferenciação. Assim, através da figura 3.76 é possível retirar o intervalo médio anual da ISGD correspondente à localização de cada uma das EMAs em estudo e, posteriormente compará-lo com a média anual da ISGD proveniente dos registos das mesmas.



Figura 3.76 – Localização das EMAs do IPMA e do LREC no Atlas da Radiação Solar.
Adaptado: (Vázquez et al., 2008).

3.6.3 RESULTADOS

Esta análise comparativa compreende, o cálculo do desvio entre a média anual da ISGD, das EMAs, das duas redes de estações meteorológicas e, do intervalo correspondente no *Atlas da Radiação Solar*. Na figura 3.76 é possível localizar as características correspondentes no mapa do *Atlas da Radiação Solar*. Os resultados desta análise são apresentados na tabela 3.24 e tabela 3.25, respetivamente, para as EMAs LREC e para as EMAs IPMA.

Tabela 3.24 – Análise comparativa da média anual da ISGD entre os registos da rede de EMAs LREC e o intervalo correspondente no Atlas da Radiação Solar.

Nome da EMA (Rede LREC)	Localização (concelho)	Altitude/Cota (m)	Média Anual da ISGD da EMA (Wh/m².dia)	Média Anual da ISGD no "Atlas da Radiação Solar" (Wh/m².dia)	Δ ISGD (Wh/m².dia)
Edifício LREC	Funchal	250	4598	[4200;4400]	198
Trapiche		590	3663	[4400;4600]	-737
P.E. Funchal		1300	3980	[4600;4800]	-620
P.E. Funchal 2		1300	4506	[4600;4800]	-94
Bica da Cana	Ponta do Sol	1600	5099	[≥5000]	99
Deserta Grande	Santa Cruz	10	3860	[≥5000]	-1140
Encumeada	São Vicente	1017	3829	[4400;4600]	-571
Machico	Machico	170	4290	[4200;4400]	90
Pico das Pedras	Santana	920	3722	[4200;4400]	-478
Porto Moniz	Porto Moniz	675	3610	[4200;4400]	-590
Prazeres	Calheta	648	4285	[4400;4600]	-115
Pico Verde		1020	5035	[≥4800]	235

Tabela 3.25 – Análise comparativa da média anual da ISGD entre os registos da rede de EMAs IPMA e o intervalo correspondente no Atlas da Radiação Solar.

Nome da EMA (Rede LREC)	Localização (concelho)	Altitude/Cota (m)	Média Anual da ISGD da EMA (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD no "Atlas da Radiação Solar" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
Observatório	Funchal	58	4462	[4200;4400]	62
Lido		25	4496	[4400;4600]	96
Pico Alto		1112		[4600;4800]	
Chão Areeiro		1590	4976	[4800;5000]	176
Lugar de Baixo	Ponta do Sol	42	4752	[4400;4600]	152
Bica da Cana		1580	3847	[≥ 5000]	-1153
Quinta Grande	Camara de Lobos	458	3654	[4400;4600]	-746
Aero. Sta. Catarina	Santa Cruz	58		[4400;4600]	
Santo da Serra		690	3121	[4200;4400]	-1079
Pta. São Lourenço	Machico	133	4493	[4600;4800]	-107
Ponta do Pargo	Calheta	278	4964	[4600;4800]	164
Porto Moniz	Porto Moniz	35		[4400;4600]	
Lombo da Terça		934	4057	[≤ 4200]	-143
São Vicente	São Vicente	110	3613	[4000;4200]	-387
São Jorge	Santana	258	4079	[4200;4400]	-121
Santana		409	3413	[4000;4200]	-587
Aero. Porto Santo	Porto Santo	78	4895	[≥ 5000]	-105

Após analisar o intervalo da média anual da ISGD correspondente a estas estações no anexo A.5, como também, a comparação entre a média anual da ISGD das EMAs e a correspondente no *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*, apresentado na tabela 3.24 e tabela 3.25, não esquecendo o enquadramento geográfico das mesmas, figura 3.76, podemos apontar as seguintes considerações:

- a) Na tabela 3.26 são apresentadas as principais características das estações meteorológicas que apresentaram uma média anual da ISGD abaixo do intervalo correspondente no *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*, com um desvio superior a 1000 Wh/m².dia.

Tabela 3.26 – EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD inferior ao intervalo correspondente no Atlas da Radiação Solar para o local, com um desvio superior a 1000 Wh/m².dia.

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD no "Atlas da Radiação Solar" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
Desertas	LREC	SP Lite	10	1,3%	< a 2% ao ano	3860	[≥ 5000]	-1140
Bica da Cana	IPMA	EP08	6	0,0%		3847	[≥ 5000]	-1153
Santo da Serra			5	2,8%		3121	[4200;4400]	-1079

Existem duas razões que ajudam a compreender os desvios apresentados por estas estações, a primeira está associada à incerteza do intervalo das linhas de cotas da ISGD do *Atlas da Radiação Solar* e, a segunda, associada à incerteza dos valores das estações meteorológicas.

A incerteza relacionada com o intervalo das linhas de cotas da ISGD apresentadas no *Atlas da Radiação Solar* é originada pela reduzida malha de *píxeis* de resolução das imagens utilizadas, o que se traduziu num reduzido número de posições, 131 pix na ilha da Madeira, 11 pix na ilha do Porto Santo e 10 pix na ilha das Desertas, com valores de ISGD. Estes valores de ISGD obtidos a partir do modelo de céu limpo precisam de ser normalizados a partir dos registos de uma rede de estações bem distribuída espacial e heterogénea, para que sejam obtidos bons resultados absolutos. No entanto, na altura, apenas estavam disponíveis cinco estações meteorológicas na ilha da Madeira e, uma na ilha do Porto Santo. Esta limitação, em termos de melhor

resolução nas imagens, e de maior número de estações meteorológicas locais afetou consideravelmente a construção das linhas de cotas da ISGD, sobrevalorizando algumas zonas. Foram três as estações que apresentaram um desvio da média anual da ISGD, superior a 1000 Wh/m².dia, comparativamente com o intervalo atribuído pelo *Atlas da Radiação Solar*.

O desvio apresentado pela **EMA da Deserta Grande**, de 1140 Wh/m².dia, é justificado pela incerteza associada às linhas de cotas da ISGD do *Atlas da Radiação Solar*, uma vez que, se situa na área da Zona X, onde os valores da ISGD do *Atlas da Radiação Solar* foram normalizados por interpolação a partir da sua proximidade às zonas normalizadas da Madeira e Porto Santo. Este procedimento de normalização, associado à limitação dos dez pixéis, que a malha utilizada disponibilizou para esta área, originou uma sobrevalorização desta zona. No entanto, como já foi referido, os registos das EMAs também apresentam-se associados a uma incerteza provocada pela percentagem de lacunas de dias e pela inexistência de manutenção/recalibração do sensor de radiação.

O desvio apresentado pela **EMA do Santo da Serra**, de 1079 Wh/m².dia, é justificado pela incerteza associada às linhas de cotas da ISGD do *Atlas da Radiação Solar*, uma vez que, encontra-se localizada na área da Zona VI, onde os valores da ISGD do *Atlas da Radiação Solar* foram normalizados por interpolação a partir dos registos das estações do Funchal e de São Jorge. Este procedimento de normalização, associado às características morfológicas do local, área com um microclima húmido, onde o relevo das montanhas (este, sul e oeste) e a nebulosidade proveniente de norte afetam a penetração da radiação solar, sobrevalorizou as linhas de cotas da ISGD desta zona no *Atlas da Radiação Solar*. No entanto, como já foi referido, os registos das EMAs também apresentam-se associados a uma incerteza provocada pela percentagem de lacunas de dias e, pela inexistência de manutenção/recalibração do sensor de radiação.

O desvio apresentado pela **EMA da Bica da Cana (IPMA)**, de 1153 Wh/m².dia, é justificado pela incerteza associada às linhas de cotas da ISGD do *Atlas da Radiação Solar*, uma vez que, encontra-se localizada na área da Zona II, onde os valores da ISGD foram normalizados por interpolação a partir dos registos da estação do Areeiro. Este procedimento de normalização, associado às características morfológicas do local, elevação rochosa de este a sudeste, com aproximadamente 20 m, sobrevalorizou as linhas de cotas da ISGD desta zona, no *Atlas da Radiação Solar*. No entanto, como já foi referido, os registos das EMAs também apresentam-se associados a uma incerteza provocada pela percentagem de lacunas de dias e, pela inexistência de manutenção/recalibração do sensor de radiação.

b) Na tabela 3.27 são apresentadas as principais características das estações meteorológicas que apresentaram uma média anual da ISGD superior a um dos limites do intervalo correspondente no *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*, com um desvio inferior a 500 Wh/m².dia.

Tabela 3.27 - EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD, superior a um dos limites do intervalo do Atlas da Radiação Solar para o local, com um desvio inferior a 500 Wh/m².dia.

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD no "Atlas da Radiação Solar" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
Bica da Cana	LREC	SP Lite	10	9,1%	< a 2% ao ano	5099	[≥ 5000]	99
Pico Verde	LREC	SP Lite	10	10,2%	< a 2% ao ano	5035	[≥ 4800]	235
Machico	LREC	SP Lite	7	11,5%	< a 2% ao ano	4290	[4200;4400]	90
Ponta do Pargo	IPMA	CM 11	9	3,9%	< a 5%	4964	[4600;4800]	164
Lugar de Baixo	IPMA	CM 11	13	6,9%	< a 5%	4752	[4400;4600]	152
Chão Areeiro	IPMA	CM 11	12	9,4%	< a 5%	4976	[4800;5000]	176
Lombo da Terça	IPMA	CM 11	6	9,5%	< a 5%	4057	[≤ 4200]	-143
Observatório	IPMA	CM 11	13	9,6%	Recalibrado	4462	[4200;4400]	62
Lido	IPMA	EP08	12	6,4%	< a 2% ao ano	4496	[4400;4600]	96
LREC	LREC	CM3	10	3,4%	< a 2% ao ano	4598	[4200;4400]	198

A incerteza associada, quer aos valores das linhas de cotas da ISGD do *Atlas da Radiação Solar*, quer aos registos das estações meteorológicas são inerentes a todas estações. No entanto, as características geográficas e morfológicas dos locais influenciam a qualidade da exposição solar a que as estações estão sujeitas.

A **EMA de Machico** apresenta uma média anual da ISGD enquadrada, no intervalo da ISGD referido pelo *Atlas da Radiação Solar*, para este local. Os valores da ISGD desta zona no *Atlas da Radiação Solar*, Zona VI, foram normalizados a partir dos registos de duas estações, uma localizada, no centro do Funchal e a outra, em São Jorge. Este procedimento como já vimos acarreta algumas incertezas, no entanto, esta EMA apresentou uma média anual enquadrada no intervalo de cotas da ISGD do *Atlas da Radiação Solar* para esta zona. Não podemos descurar a percentagem de lacunas que esta EMA apresenta nem o facto de o sensor de radiação não ser recalibrado desde a sua instalação razões que influenciam os valores da ISGD desta EMA.

As EMAs, da **Bica da Cana**, do **Pico Verde**, do **Chão do Areeiro** e do **Lombo da Terça** apresentam a sua média anual da ISGD enquadrada, no intervalo da ISGD referido pelo *Atlas da Radiação Solar*, para estes locais. Estas EMAs apresentam em comum o facto de se localizarem acima dos 900 m, dispondo na fase positiva da declinação solar de uma maior disponibilidade de radiação solar e, de os valores da ISGD destas zonas terem sido normalizados a partir dos registos da mesma estação, localizada no Chão do Areeiro. Não podemos desconsiderar também que ambas as EMAs apresentam uma percentagem de lacunas de dias inferior a 11% e que consoante o tipo de sensor de radiação apresentam uma quebra gradual da sua sensibilidade provocada pela inexistência de manutenção.

As EMAs, da **Ponta do Pargo** e do **Lugar de Baixo**, apresentam a sua média anual da ISGD superior, à do intervalo da ISGD referido pelo *Atlas da Radiação Solar*, para estes locais. Estas EMAs apresentam em comum o facto de se localizarem no lado sul da ilha, em áreas onde morfologicamente também apresentam uma boa exposição solar. Estes locais, no *Atlas da Radiação Solar*, estão incluídos na Zona IV, onde os valores da ISGD foram normalizados por interpolação dos registos de duas estações, uma localizada no Lugar de Baixo e a outra na Ponta do Pargo. Não podemos desconsiderar que embora sejam mínimas, ambas as EMAs, apresentam uma percentagem de lacunas de dias, inferior a 7%, e uma quebra da sensibilidade do sensor de radiação, inferior a 5%, ao fim do tempo de funcionamento que apresentam.

A **EMA do Lido** apresenta uma média anual da ISGD enquadrada, no intervalo da ISGD referido pelo *Atlas da Radiação Solar*, para este local. Os valores da ISGD desta zona no *Atlas da Radiação Solar*, Zona III, foram normalizados por interpolação a partir dos registos de duas estações, uma localizada no centro do Funchal e a outra no Lugar de Baixo. O procedimento de definição das linhas de cota para o Funchal teve em consideração as áreas afetadas à influência de fenómenos atmosféricos, “capacete” e nebulosidade de norte, não englobando as áreas contíguas à Ponta Gorda, inferior à cota dos 50 m, onde se localiza a EMA do Lido, pois dadas as características morfológicas do local apresenta uma maior exposição solar.

As EMAs, do **LREC** e do **Observatório** apresentam uma média anual da ISGD superior, à do intervalo da ISGD referido pelo *Atlas da Radiação Solar*, para estes locais. A justificação principal assenta no facto de que, a área afeta a este intervalo da ISGD, englobar toda a área inferior à cota do 500 m, excetuando a Ponta Gorda. No entanto, como já foi referido, os registos das EMAs também apresentam-se associados a uma incerteza provocada pela percentagem de lacunas de dias e, pela inexistência de manutenção/recalibração do sensor de radiação. Estas EMAs apresentam uma percentagem de lacunas inferior a 10% e, apenas a EMA do Observatório se encontra recalibrada, pelo que, a quebra da sensibilidade nos sensores das restantes duas estações, é inferior a 2% ao ano.

- c) Na tabela 3.28 são apresentadas as principais características das estações meteorológicas que apresentaram uma média anual da ISGD menor que o intervalo correspondente no *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*, com um desvio inferior a 1000 Wh/m².dia.

Tabela 3.28 – EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD, menor que o intervalo correspondente no *Atlas da Radiação Solar* para o local, com um desvio inferior a 1000 Wh/m².dia.

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD no "Atlas da Radiação Solar" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
Santana	IPMA	SP Lite 2	5	0,0%	< a 2% ao ano	3413	[4000;4200]	-587
São Vicente			5	0,0%		3613	[4000;4200]	-387
Pico das Pedras			6	15,7%		3722	[4200;4400]	-478
P.E.Funchal 2	LREC	SP Lite	5	1,6%		4506	[4600;4800]	-94
P.E.Funchal			9	20,9%		3980	[4600;4800]	-620
Porto Moniz			10	22,4%		3610	[4200;4400]	-590
Trapiche			4	35,5%		3663	[4400;4600]	-737
Prazeres			5	42,7%		4285	[4400;4600]	-115
Pta. São Lourenço			6	1,2%		4493	[4600;4800]	-107
São Jorge	IPMA	CM 11	14	7,6%	< a 5%	4079	[4200;4400]	-121
Aero. Porto Santo			12	8,2%		4895	[≥ 5000]	-105
Quinta Grande		EP08	5	0,0%	< a 2% ao ano	3654	[4400;4600]	-746
Encumeada	LREC	CM3	10	5,4%	< a 2% ao ano	3829	[4400;4600]	-571

A incerteza associada aos valores da ISGD das linhas de cota do *Atlas da Radiação Solar* é a principal justificação para os desvios apresentados pelas EMAs, do lado norte e este da ilha, no entanto, estes são mais ou menos atenuados, pelas características geográficas e morfológicas dos locais de instalação das estações. Os valores da ISGD do *Atlas da Radiação Solar*, no lado norte e este da ilha, foram normalizados através da utilização de conjuntos de duas estações, mas apenas uma dessas estações localiza-se, no lado norte da ilha, em São Jorge. Este procedimento representa uma sobrevalorização das linhas de cotas, do lado norte da ilha,

porque no caso da Zona V, os valores de ISGD foram normalizados com recurso aos valores da ISGD da estação do lado norte, Ponta de São Jorge, que dispõe de condições de exposição solar que a maioria não tem, associados aos valores superiores de ISGD da estação da Ponta do Pargo, no lado sul da ilha, igualmente com condições de exposição solar que a maioria não dispõe. No caso da Zona VI, os valores de ISGD foram normalizados com recurso aos valores da ISGD da estação de São Jorge associado aos valores superiores da ISGD da estação do Funchal, no lado sul da ilha. De entre as EMAs, de Santana, de São Vicente, do Pico das Pedras, do Porto Moniz, e de São Jorge, localizadas no lado norte da ilha, a EMA de São Jorge foi a que apresentou o desvio mais pequeno.

O desvio apresentado pela **EMA de São Jorge**, de $121 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, é justificado pela incerteza associada aos valores do *Atlas da Radiação Solar*, uma vez que a estação encontra-se na área de separação da Zona V com a VI, onde os valores da ISGD foram normalizados a partir dos registos do conjunto de duas estações, São Jorge com Ponta do Pargo, ou, São Jorge com Funchal. A boa exposição solar que o local tem, dadas as características geográficas e morfológicas, também contribui para a redução do desvio. No entanto, existe também uma pequena incerteza associada aos registos da EMA, porque o sensor não é recalibrado desde a sua instalação, o que provoca uma perda gradual de sensibilidade do sensor, inferior a 5%, em 14 anos, de funcionamento e, devido à percentagem de lacunas de dias, nos registos da estação, ser de 7,6%.

O desvio apresentado pela **EMA da Ponta de São Lourenço**, cerca de $100 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, localizada no lado este da ilha, foi o mais pequeno. É justificado pela incerteza associada aos valores do *Atlas da Radiação Solar*, uma vez que a estação encontra-se na Zona VI, onde os valores da ISGD foram normalizados a partir dos registos da estação de São Jorge e do Funchal e pela boa exposição solar que o local tem. No entanto, existe também uma pequena incerteza associada aos registos da estação, porque o sensor não é recalibrado desde a sua instalação, o que provoca uma perda gradual da sua sensibilidade, inferior a 5%, em 6 anos de funcionamento (CM 11) e, devido à percentagem de lacunas de dias, nos registos da estação, ser de 1,2%.

Relativamente ao desvio apresentado pelas EMAs, do lado sul da ilha, a maioria das estações apresenta uma elevada percentagem de lacunas de dias, acima de 10%, que associado ao facto de não serem realizados procedimentos de manutenção aos sensores de radiação, representa uma considerável incerteza associada aos valores da ISGD, principalmente das **EMAs do Trapiche e dos Prazeres**.

O pequeno desvio apresentado pela **EMA dos Prazeres**, de $115 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, é justificado pela elevada incerteza associada aos registos da EMA, devido à elevada percentagem de lacunas de dias nos registos, de 42,7 %, como também, porque o sensor não é recalibrado desde a sua instalação, o que provoca uma perda gradual da sua sensibilidade, inferior a 2% ao ano (5 anos / SP Lite). No entanto, também existe uma incerteza associada aos valores do *Atlas da Radiação Solar*, porque esta estação, localizada na Zona IV, onde os valores da ISGD foram normalizados por interpolação, a partir dos registos da estação do Lugar de Baixo e da Ponta do Pargo.

O elevado desvio apresentado pela **EMA do Trapiche**, de $737 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, é justificado em parte, pela elevada incerteza associada aos registos da EMA, devido à alta percentagem de lacunas de dias nos registos, de 35,5

%, como também, porque o sensor não é recalibrado desde a sua instalação, o que provoca uma perda gradual da sua sensibilidade, inferior a 2% ao ano (5 anos / SP Lite). A influência dos fenómenos atmosféricos caraterísticos do Funchal nesta área não nos foi permitido apurar devido à elevada percentagem de falhas, mas tem a sua quota-parte de justificação. Existe igualmente, associado a este desvio, a incerteza nos valores da ISGD do *Atlas da Radiação Solar*, porque os valores da Zona IV onde está localizada a EMA, foram normalizados por interpolação a partir dos registos da estação do Funchal e do Lugar de Baixo.

O elevado desvio apresentado pela **EMA do Parque Ecológico do Funchal**, de 620 Wh/m².dia, é justificado pela elevada incerteza associada aos registos da estação, originada pela perda gradual da sensibilidade do sensor de radiação solar, inferior a 2% ao ano e, pela elevada percentagem de lacunas de dias, 20,9%, nos registos da estação. No entanto, também é justificado pela incerteza associada aos valores do *Atlas da Radiação Solar*, uma vez que a estação encontra-se na zona de transição, entre o interior e a costa, onde os valores da ISGD foram normalizados a partir dos registos da estação do Areeiro e do centro do Funchal. Como já foi referido anteriormente o elevado desvio apresentado levou a que fosse realizada uma análise mais pormenorizada aos registos desta estação, onde foi detetado que, em agosto de 2010, o sensor poderá ter ficado danificado, pelo calor emitido no grande incêndio, que destruiu mais de 90% do Parque Ecológico do Funchal. Assim, na tabela 3.28 está também incluída a média anual que a EMA do PE do Funchal apresentava antes do incêndio, **PE do Funchal 2**, pelo que é possível verificar um valor de ISGD mais próximo do intervalo atribuído pelo *Atlas da Radiação Solar* e, que dadas as caraterísticas geográficas, à cota dos 1300 m, e morfológicas do local de instalação é mais aceitável.

O desvio apresentado na **EMA da Quinta Grande**, cerca de 760 Wh/m².dia, é justificado pela incerteza associada aos valores do *Atlas da Radiação Solar*, uma vez que, a estação encontra-se localizada na área da Zona III, onde os valores da ISGD foram normalizados por interpolação a partir dos registos da estação do Funchal e do Lugar de Baixo. Este procedimento associado ao facto de que a estação encontra-se localizada no interior de um vale em “V”, com orientação norte/su-sudoeste, com as linhas de cumeada à cota superior a 400 m origina um menor número de horas de exposição solar do local. No entanto, existe também uma incerteza associada aos registos da estação, devido exclusivamente ao facto de que o sensor não é recalibrado desde a sua instalação, o que provoca uma perda gradual da sua sensibilidade, inferior a 2% ao ano.

O desvio apresentado pela **EMA da Encumeada**, de 571 Wh/m².dia, é justificado pela incerteza associada aos valores do *Atlas da Radiação Solar*, uma vez que, a estação encontra-se localizada na área da Zona de transição entre o interior e a costa, normalizada por interpolação a partir dos registos da estação do Areeiro e São Jorge. No entanto, existe também uma incerteza associada aos registos da estação, porque o sensor não é recalibrado desde a sua instalação, o que provoca uma perda gradual da sua sensibilidade, inferior a 2% ao ano e, devido à percentagem de lacunas de dias nos registos da estação, ser de 7,6%.

3.6.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este estudo comparativo, por concelho, entre a média anual da ISGD das EMAs e o intervalo da média anual da ISGD correspondente no *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*, permitiu confrontar os registos apresentados pelas EMAs, com os indicados pelo *Atlas da Radiação Solar*, obtidos através do modelo de céu limpo normalizado por interpolação dos registos de seis estações meteorológicas locais, e assim proceder a uma validação parcial dos registos apresentados pelas EMAs.

A ambas as partes estão associadas incertezas aos registos. A incerteza associada aos registos das EMAs é proveniente da elevada percentagem de lacunas de dias e da inexistência de manutenção aos sensores de radiação solar. Relativamente à incerteza associada aos intervalos da média da ISGD do *Atlas da Radiação Solar*, esta deve-se, ao facto de que no procedimento de obtenção de dados, a partir do modelo de céu limpo, à data a disponibilidade tecnológica não permitiu a utilização de uma malha com uma maior resolução. O procedimento posterior foi a normalização dos valores obtidos por interpolação dos registos de seis estações meteorológicas locais, cinco na Madeira e uma no Porto Santo, no entanto, esta vantagem de disponibilidade de um número razoável de estações meteorológicas, fundamental para locais com declives acentuados, foi ofuscada pela malha grosseira utilizada.

A incerteza associada aos intervalos da média da ISGD do *Atlas da Radiação Solar* é originada pela metodologia disponível, utilizada na sua construção, ou seja, o procedimento de obtenção de dados a partir do modelo de céu limpo, à data, não dispôs de uma disponibilidade tecnológica que permitisse a utilização de uma malha com uma maior resolução, fundamental numa área com declives acentuados. No entanto, o modelo de céu limpo, por si só, não produz resultados bons, em termos absolutos, assim, é fundamental integrar nestes, os valores obtidos por estações meteorológicas existentes na região, de forma a converter, os bons dados relativos, em bons dados absolutos. A morfologia da ilha da Madeira impossibilita que este processo, denominado de normalização, produza bons resultados absolutos, apenas com a utilização dos registos de uma única estação meteorológica, como foi o caso da base de dados do PVGIS, ou mesmo neste caso que disponha de cinco estações meteorológicas na Madeira e uma no Porto Santo. Em ilhas como a da Madeira, é necessário um maior número de estações meteorológicas, para que sejam cobertos todos os microclimas existentes, encurtando as distâncias entre estações e impossibilitando a utilização de registos de estações para normalização, em posições geográficas opostas. De notar que embora na metodologia do *Atlas da Radiação Solar* tenham sido utilizadas mais estações meteorológicas distribuídas pela ilha no procedimento de normalização este aspeto foi “ofuscado” pelo facto de que a malha disponível era grosseira para a análise de uma região, com as características morfológicas, geográficas e atmosféricas que o arquipélago da Madeira apresenta.

Assim e tendo em consideração tudo o que já foi concluído acerca dos registos das EMAs das duas redes meteorológicas locais, no subcapítulo 3.4.2 relativamente às EMAs da rede LREC, no subcapítulo 3.4.5 relativamente às EMAs da rede IPMA, no subcapítulo 3.4.6 relativamente ao estudo comparativo entre ambas as estações, por concelho, e no subcapítulo 3.5 referente ao estudo comparativo entre a variação anual da

ISGD das EMAs com a correspondente na base de dados do PVGIS podemos concluir o seguinte acerca dos registos das EMAs após este estudo comparativo com o intervalo da média da ISGD correspondente no *Atlas da Radiação Solar*.

Das EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD menor que o intervalo correspondente no *Atlas da Radiação Solar*, com um desvio superior a 1000 Wh/m².dia, duas localizam-se na Madeira e uma nas Desertas. O desvio apresentado pelas EMAs localizadas na Madeira, Bica da Cana (IPMA) e Santo da Serra, deveu-se ao facto de que a resolução da malha utilizada na construção do *Atlas da Radiação Solar* não permitir identificar e quantificar áreas onde as características morfológicas, geográficas e atmosféricas influenciam fortemente a incidência da radiação solar na superfície. No caso da estação localizada nas Desertas, Deserta Grande a principal razão para o desvio apresentado está associado à metodologia utilizada para a normalização dos valores obtidos de ISG a partir do modelo de céu limpo, uma vez que, dada a inexistência de uma estação meteorológica local foram utilizados os registos já normalizados da ilha da Madeira e os da ilha do Porto Santo.

Das EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD menor que o intervalo correspondente no *Atlas da Radiação Solar*, com um desvio inferior a 750 Wh/m².dia, são de destacar duas EMAs, Trapiche e PE do Funchal que, dadas as suas características morfológicas, geográficas e atmosféricas associadas à incerteza existente relativamente à distribuição geográfica da radiação solar global apresentada pelo *Atlas da Radiação Solar* apresentam dos desvios maiores. Como já foi referido anteriormente, a EMA do Trapiche apresenta um curto período de funcionamento que, associado à elevada percentagem de lacunas não permite que seja realizado um estudo mais pormenorizado dos seus registos e consequente análise global da incidência de radiação solar neste local. Ainda assim este estudo comparativo corrobora com a necessidade de um estudo mais abrangente a este local. Relativamente à EMA do PE do Funchal, já foi igualmente detetado que esta estação possui uma anomalia no seu sensor de radiação solar pois apresenta uma quebra na quantificação da radiação solar global a partir de agosto de 2010. Posto isto, foi incluído neste estudo comparativo, a média anual da ISGD que esta EMA apresentava até agosto de 2010, de forma a permitir uma análise comparativa, com dados mais realistas, desta estação. O desvio apresentado foi ainda assim negativo mas muito próximo do intervalo da média anual da ISGD correspondente para o local no *Atlas da Radiação Solar*.

No que diz respeito às restantes estações, que apresentam um desvio enquadrado neste intervalo, a influência conjunta da incerteza associada aos registos das EMAs e à distribuição geográfica da radiação solar global no *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira* não permite uma análise mais pormenorizada acerca dos resultados obtidos, ainda assim, podemos constatar a influência que as características morfológicas, geográficas e atmosféricas do local provocam nos desvios apresentados pelas EMAs em estudo.

As EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD maior que o intervalo correspondente no *Atlas da Radiação Solar*, com um desvio inferior a 300 Wh/m².dia, apresentam características morfológicas, geográficas e atmosféricas favoráveis a uma boa exposição solar. A quase totalidade das estações que apresentam uma

média anual superior à atribuída pelo Atlas situa-se no lado sul da ilha, três das quais, localizam-se a uma cota superior aos 1000 m, três no concelho do Funchal, três em locais próximos da linha costeira e, apenas uma localiza-se no lado norte, a uma cota superior aos 900 m.

Em suma, após esta análise foi possível verificar que os valores apresentados pelo *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira* são na sua globalidade aceitáveis, dadas as restrições existentes na altura da sua elaboração, como o número de estações meteorológicas disponíveis para a normalização dos valores da ISGD obtidos a partir do modelo de céu limpo, modelo que apresentava uma resolução grosseira num estudo que se pretendia pormenorizado. A utilização de uma malha grosseira em locais com declives acentuados implicará que existam alguns locais que não estejam devidamente identificados e quantificados pois as suas características morfológicas, geográficas e atmosféricas ainda que, associadas a possíveis incertezas dos valores indicados, influenciam a incidência da radiação solar. Neste caso de estudo foram detetadas, alguns locais com estações meteorológicas que apresentam uma ISGD, substancialmente inferior, ao correspondente no *Atlas da Radiação Solar*.

4 MANUTENÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS E DE FINS MÚLTIPLOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é feita uma abordagem ao funcionamento e manutenção da rede de sistemas *híbridos* renováveis, em locais isolados, implementada no âmbito do Projeto PAUER. Este projeto foi criado no ano de 2000, para o aproveitamento de recursos energéticos renováveis e visou a instalação dos seguintes sistemas:

- Instalação do sistema isolado híbrido (PV + Eólico) para alimentar a Casa Florestal dos Estanquinhos;
- Instalação do sistema isolado híbrido (PV + Eólico) para alimentar a casa de apoio aos vigilantes do Parque Natural da Madeira, nas Ilhas Desertas (Deserta Grande);
- Instalação do sistema fotovoltaico isolado para alimentar o sistema de iluminação pública do LREC (São Martinho I);
- Instalação do sistema fotovoltaico isolado para alimentar a Casa Florestal da Bica da Cana;
- Instalação do sistema isolado híbrido (PV + Eólico) para alimentar o Posto Florestal do Fanal.
- Instalação do sistema fotovoltaico isolado para alimentar a Casa da Direção Regional de Florestas, na Ilha do Porto Santo;
- Instalação do sistema fotovoltaico isolado para alimentar o Posto de Vigilância do Ilhéu Chão, nas Ilhas Desertas;
- Instalação do sistema fotovoltaico isolado para alimentar a casa de apoio ao Posto de Vigilância da Selvagem Grande, nas Ilhas Selvagens;
- Instalação do sistema fotovoltaico para apoiar o secador solar da Quinta Pedagógica dos Prazeres;
- Instalação do sistema isolado híbrido (PV + Eólico) para alimentar a casa de apoio aos vigilantes do Parque Natural da Madeira, nas Ilhas Desertas (Deserta Grande);
- Instalação do sistema fotovoltaico isolado para alimentar um sistema de força motriz no LREC (São Martinho II);
- Instalação do sistema fotovoltaico isolado para alimentar a Torre de Vigia, no Pico do Suna;
- Instalação do sistema fotovoltaico para alimentar a Torre de vigia, na Fonte do Bispo;
- Instalação do sistema fotovoltaico isolado para alimentar a Casa Florestal da Cova Grande;
- Instalação do sistema isolado híbrido (PV + Eólico) para alimentar o Posto Florestal da Casa do Burro;
- Instalação do sistema fotovoltaico isolado para alimentar a Casa Florestal das Funduras.

A manutenção destes sistemas fotovoltaicos teve como objetivo: estudar a degradação dos materiais constituintes dos módulos fotovoltaicos. Em consequência destes possíveis defeitos existentes, está a redução da potência gerada, relativamente à espetável. A inspeção periódica deve ser iniciada, logo após a instalação do sistema, de forma a garantir o correto funcionamento do mesmo.

Na tabela 4.1 descrevem-se sucintamente as características dos sistemas *híbridos* renováveis isolados instalados no âmbito do Projeto PAUER e o seu estado de funcionamento atual.

Tabela 4.1 – Características dos sistemas híbridos isolados instalados no âmbito do Projeto PAUER do LREC.

Local	Sistema Fotovoltaico (Wp)	Sistema Eólico (W)	Inversor (W)	Baterias (Ah)	Início	Estado
Estanquinhos	1200	400	2400	750	2002	Sem sistema eólico
Deserta Grande I	1232	500	3300	1200	2002	Sem sistema eólico
São Martinho I	1280	-	3300	1200	2003	Inoperacional
Bica da Cana	1600	-	3300	1500	2003	Operacional
Fanal	640	1500	1500	1500	2003	Desmantelado
Porto Santo	500	-	450	380	2004	Operacional
Ilhéu Chão (Deserta)	256	-	450	380	2004	Operacional
Selvagem Grande	1200	-	3300	650	2004	Operacional
Q.P. Prazeres	1280	-	3300	1200	2004	Operacional
Deserta Grande II	1232	500	3300	1200	2005	Sem sistema eólico
São Martinho II	500	-	450	380	2006	Inoperacional
Torre Pico do Suna	500	-	450	380	2006	Inoperacional
Torre Fonte do Bispo	500	-	450	380	2006	Inoperacional
Cova Grande	1280	-	3300	1200	2006	Operacional
Casa do Burro	1280	400	2300	1500	2007	Sem sistema eólico
Funduras	1600	-	3300	2000	2007	Operacional

4.2 MANUTENÇÃO DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos têm geralmente uma garantia contra defeitos de fabrico de 3 a 5 anos, e, uma garantia de rendimento mínimo, durante 25 anos. Num sistema energético fotovoltaico, os módulos fotovoltaicos não são a principal causa de problemas, mesmo assim, é fundamental a inspeção periódica visual e técnica, tanto aos módulos fotovoltaicos como, aos restantes componentes elétricos. A manutenção preventiva consiste, num conjunto de ações programadas, para garantir o bom funcionamento e consequente, vida útil dos componentes evitando falhas, no funcionamento do sistema energético.

4.2.1 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Numa inspeção de manutenção, aos sistemas fotovoltaicos em termos visuais, deverão ser tidos em conta a análise aos seguintes parâmetros:

- Degradação dos materiais encapsulantes originada por delaminação, descoloração da EVA, bolhas de ar, alterações nas propriedades do vidro, o vidro partido, degradação da conexão entre as células, corrosão/oxidação dos materiais e, ou degradação do revestimento anti refletor;
- Degradação no semicondutor originada por células quebradas, aumento da resistência paralelo e, ou formação de hot-spot/ponto quente;
- Sombreamentos ao sistema fotovoltaico originados por sombras temporárias, sombras causadas pela localização da instalação, sombras causadas pelo edifício, sombras devido aos painéis vizinhos e, ou sujidade dos módulos fotovoltaicos;
- Verificação do ângulo de inclinação.

Numa inspeção de manutenção, aos sistemas fotovoltaicos, em termos elétricos, deverão ser tidos em conta, a análise de duas grandezas: a tensão de circuito aberto (V_{OC}) e a corrente de curto-circuito (I_{SC}).

Análise da tensão de circuito aberto (V_{OC}) em sistemas fotovoltaicos formados por mais de uma fileira de módulos, em termos simplificados, engloba a medição da V_{OC} por fileira e a consequente comparação com os valores obtidos nas restantes, os quais, devem ser similares. Pode-se igualmente analisar esta componente elétrica, o valor de V_{OC} do gerador fotovoltaico, simbologia A da figura 4.1, comparativamente com o valor de V_{OC} especificado pelo fabricante, com a devida correção devido à influência da temperatura. Em função da imprecisão, inerente à metodologia, desvios de até 15% em relação ao valor esperado calculado, são considerados aceitáveis.

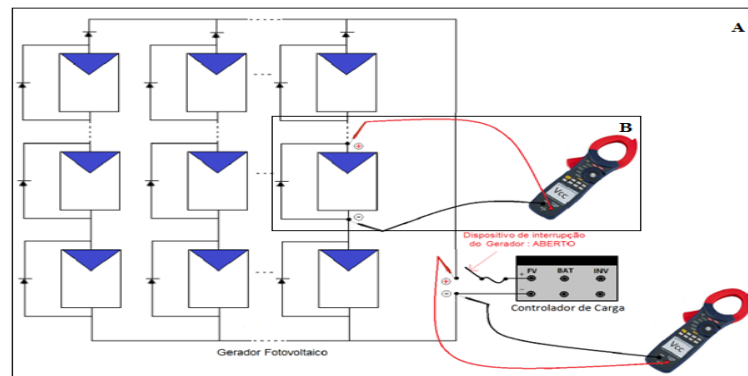


Figura 4.1 – Exemplo de medição da tensão de circuito aberto de um sistema energético fotovoltaico. Adaptado: (Pinho & Galdinho, 2014).

A análise da corrente de curto-circuito (I_{SC}), em sistemas fotovoltaicos formados por mais de uma fileira de módulos, em termos simplificados, engloba a medição da I_{SC} por fileira e a sua comparação com os valores obtidos nas restantes, os quais, devem ser similares. Pode-se também analisar esta componente elétrica por comparação entre o valor de I_{SC} do gerador fotovoltaico, simbologia A da figura 4.2, e, o valor de I_{SC} especificado pelo fabricante, com a devida correção devido à influência das condições de irradiância. Em função da imprecisão inerente à metodologia, desvios de I_{SC} compreendidos entre $\pm 15\%$ entre fileiras, bem como ao valor esperado calculado, são considerados aceitáveis.

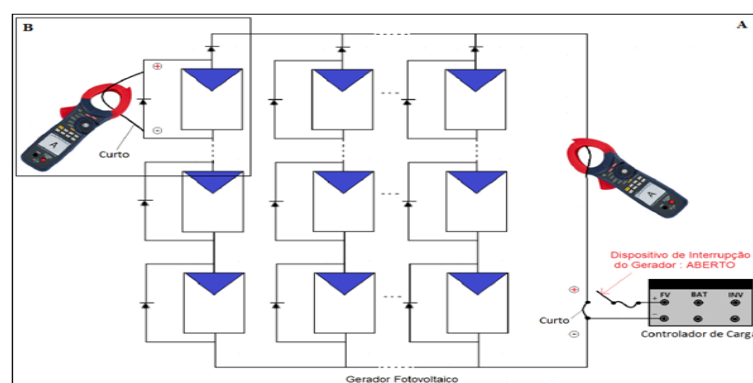


Figura 4.2 – Exemplo de medição da corrente de curto-circuito de um sistema energético fotovoltaico. Adaptado: (Pinho & Galdinho, 2014).

Atualmente existe a possibilidade de analisar estes dois parâmetros elétricos, com recurso a um traçador de curvas I-V portátil. Esta ferramenta veio permitir a deteção, muito mais precisa e confiável, de problemas em painéis fotovoltaicos e em sistemas fotovoltaicos. O seu funcionamento baseia-se, num varrimento de toda a faixa de tensão de operação do módulo, para obter os pontos da curva I-V, sendo assim, capaz de fornecer,

além das curvas I-V e P-V todos os seus parâmetros: I_{SC} , V_{OC} , V_{MP} , I_{MP} , P_{MP} e FF, já convertidos para as STC. A partir, do formato visual da curva I-V é possível retirar algumas elações, em termos de identificação de anomalias nas células/módulos, onde a figura 4.3 resume as 5 principais irregularidades: resistência série, resistência paralela, redução na I_{SC} , redução na V_{OC} e perdas por *mismatch*.

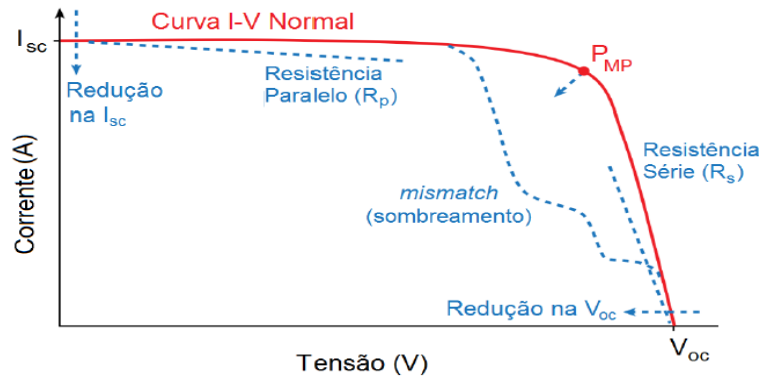


Figura 4.3 – Identificação de anomalias nas células/módulos a partir de uma curva I-V.

Fonte: (Pinho & Galdinho, 2014).

4.2.2 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO DOS BANCOS DE BATERIAS

Os bancos de baterias, instalados na rede de sistemas híbridos renováveis, em locais isolados, implementados, no âmbito do Projeto PAUER, necessitam de reposição de água, por isso, a manutenção a ser realizada, exige alguns cuidados como: a verificação do nível e a densidade do eletrólito periodicamente, a fim de, evitar danos à bateria e consequentemente reduzir a sua vida útil. O intervalo de verificação destes parâmetros, depende das condições climáticas (lugares mais quentes poderá representar maior perda de água), das condições de uso (maior profundidade de descarga induz maior perda de água do eletrólito) e da “saúde” da bateria (células em curto aceleram a evaporação da água do eletrólito).

A manutenção dos bancos de baterias inclui: a limpeza, aperto de conectores, adição de água, verificação das condições e do desempenho. É importante manter um registo histórico dos seguintes parâmetros, sempre que é realizada uma vistoria de manutenção, ao banco de baterias: tensão de cada elemento, tensão total do banco, nível e densidade do eletrólito, de cada elemento, quantidade de água, adicionada a cada elemento, e, as anomalias verificadas.

Para realizar a medição, da densidade e da tensão de circuito aberto é necessário desconectar o conjunto de baterias do sistema e deixá-lo a estabilizar a tensão, no mínimo 20 minutos, e, de preferência, ao fim da tarde de um dia ensolarado, quando estas devem estar totalmente carregadas.

O densímetro indica o estado de carga da bateria, por determinação da densidade do eletrólito, e, só deve ser utilizado, após ter completado pelo menos um ciclo completo de carga-descarga caso, tenha sido completado, o nível do eletrólito. Existem baterias de chumbo-ácido seladas que trazem, embutido no seu interior, um densímetro especial, com compensação de temperatura, indicando o estado da bateria tipicamente, em três níveis (Densidade OK, Densidade baixa e baixo nível de eletrólito) e, caso seja detetado o último nível é necessário proceder à substituição da bateria.

No que diz respeito, ao cálculo da tensão de circuito aberto do banco de baterias, ou, das baterias individualmente, esta pode ser calculada, com recurso a um voltímetro de precisão, como o indicado na figura 4.4.

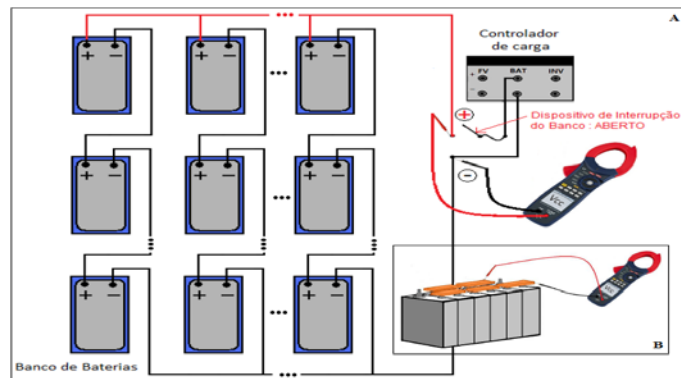


Figura 4.4 - Exemplo de medição da tensão de circuito aberto de um banco de baterias.
Adaptado: (Pinho & Galdinho, 2014).

O nível de carga aproximada da bateria deve ser determinado com auxílio dos valores definidos pelo fabricante da bateria. Na tabela 4.2 é apresentada uma relação entre a tensão das baterias ácidas, o nível de carga das mesmas e a densidade específica. Após realizar as medições das densidades específicas, das baterias individualmente, é necessário, ter em atenção que, valores inferiores a 1,150 g/dm³ podem significar falha ou curto-circuito, entre placas. As principais anomalias verificadas são: rachaduras na carcaça da bateria, bateria com deformações (inchada) e eletrólito derramado, junto aos terminais, ou, no chão. Os terminais das baterias devem estar protegidos da oxidação, pelo que, devem ser limpos e tratados, a cada doze meses, com um inibidor de corrosão. Todas as conexões de cabos devem estar bem firmes e, caso seja detetada oxidação, deve ser evitado forçar o conector, para não danificar o terminal da bateria.

Tabela 4.2 – Relação entre a capacidade e a tensão das baterias ácidas.
Adaptado: (Northern Arizona Wind & Sun, 2015).

Nível de carga	Tensão do sistema (24V)	Tensão de cada célula (2V)	Densidade específica (g/dm ³)
100%	25,44	2,12	1.280
90%	25,00	2,08	1.263
80%	24,84	2,07	1.250
70%	24,64	2,05	1.236
60%	24,40	2,03	1.223
50%	24,12	2,01	1.210
40%	23,80	1,98	1.192
30%	23,50	1,96	1.179
20%	23,16	1,93	1.166
10%	22,62	1,89	1.153
0%	21,00	1,75	1.140

4.2.3 TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE POTÊNCIA

A manutenção destes equipamentos assenta principalmente, na verificação do seu correto funcionamento, atualmente representados por leds, LCD, etc.

No caso dos controladores de carga deve ser verificado os valores dos set-points, da tensão do controlador de carga, em relação às especificidades das baterias, a temperatura de operação, a existência de ruídos anormais e indicações de alarme, no ecrã, ativadas.

Relativamente aos inversores deve ser verificado igualmente a presença de algum alarme acionado no display do equipamento, a tensão e frequência de saída, tanto, sem carga como com carga máxima, e, a corrente contínua, sem e com, carga.

Por fim, o cabeamento, os dispositivos e restantes acessórios elétricos, do sistema energético fotovoltaico, devem ser verificados de maneira a detetar possíveis fusíveis e disjuntores danificados, ligações queimadas ou oxidadas, curtos-circuitos entre cabos condutores de diferentes polaridades, etc.

4.2.4 A IMPORTÂNCIA DA TERMOGRAFIA NO APOIO À VERIFICAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

A termografia é uma técnica, não invasiva, de deteção da distribuição da energia térmica emitida pela superfície de, um ou vários corpos, através da radiação infravermelha emitida pelos mesmos. Desde a sua descoberta que, uma das suas principais aplicações é na indústria, tanto a nível da análise dos sistemas elétricos, dos sistemas mecânicos, da eletrónica como, dos sistemas de transferência de energia. Esta é uma ferramenta com forte implementação na manutenção preditiva, preventiva e condicionada. Existem diversos fatores que influenciam, na medição da radiação infravermelha, que podem levar a conclusões erradas, pelo que, é necessário ter em conta algumas precauções, antes e durante os ensaios termográficos. Estes erros podem ser classificados em três tipos:

a) Erros de medição típicos;

- Incorreta avaliação da emissividade do objeto originada pela influência do ângulo de visão, influência da temperatura atmosférica e do ambiente e, ou pela influência da distância entre o objeto e a câmara. Na figura 4.5 é apresentada a influência do ângulo de incidência na variação da emissividade.

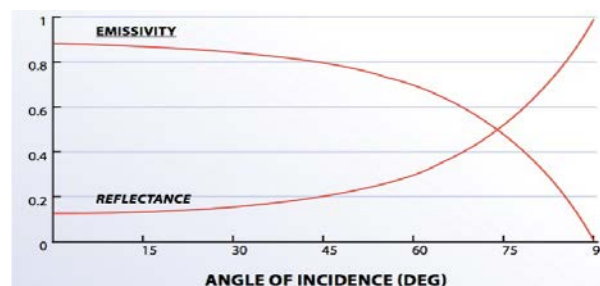


Figura 4.5 – Influência do ângulo de incidência na variação da emissividade.

Fonte: (FLIR Systems Inc., 2010b).

A emissividade de uma superfície diminui, quando o ângulo de visão aumenta e, por conseguinte, a refletância da superfície do objeto também, em relação à sua normal. Apesar do vidro ter uma emissividade entre os 0,85 e os 0,90 numa banda de onda, compreendida entre, os 8 a 14 μm , as medições térmicas das superfícies envidraçadas apresentam algumas complexidades. As reflexões do vidro são especulares, o que significa que os objetos ao redor, com temperaturas diferentes, influenciam a imagem térmica, podendo induzir em erro, numa deteção de um falso ponto quente, e consequente, numa medição errada. Assim, para evitar o reflexo da câmara de imagem térmica e do operador, no

vidro, não se deve posicionar perpendicularmente, ao módulo a inspecionar, conforme demonstrado na figura 4.6 (FLIR Systems Inc., 2010b).

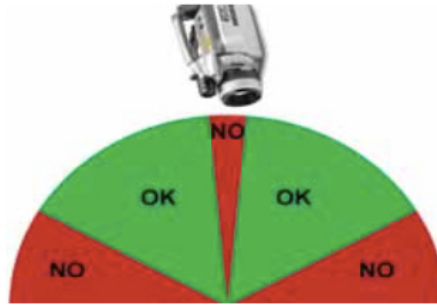


Figura 4.6 – Ângulos de manuseamento da Câmara termográfica captura de imagens.

Fonte: (FLIR Systems Inc., 2010b).

- Influência da radiação incidente (direta/refletida) no detetor da câmera;
 - Incorreta avaliação da transmissão e radiação atmosférica. O ambiente entre o objeto a medir e a câmera termográfica é, arduamente influenciado, pela transmissão atmosférica, temperatura ambiente, vento, chuva, humidade relativa do ar e, pela irradiação solar que atenuam ou reduzem, o sinal infravermelho passível de ser detetado.
- b) Erros de calibração. A calibração deve ser realizada em conformidade com o respetivo manual;
- c) Erros eletrónicos.

A termografia pode então ser utilizada, em termos qualitativos ou quantitativos, dependendo do objetivo e da natureza do ensaio. Numa abordagem qualitativa, o detalhe é um aspeto descurado visto se tratar de uma análise superficial do problema. Por outro lado, numa abordagem quantitativa, as temperaturas superficiais requerem maior detalhe e registo, dos parâmetros analíticos.

Devido à necessidade de realizar uma manutenção cuidada, aos sistemas *híbridos* renováveis, a implementação da termografia ativa ou passiva veio permitir, prever, detetar e solucionar defeitos e problemas de redução da eficiência nestes sistemas. A termografia é atualmente utilizada na investigação, desenvolvimento, fabrico, instalação e manutenção dos diversos sistemas fotovoltaicos, térmicos e termodinâmicos bem como, nos restantes componentes do sistema energético (baterias, inversor, reguladores de carga, cablagens, ligadores, etc.).

4.3 CARATERIZAÇÃO DA CÂMERA TERMOGRÁFICA UTILIZADA



Figura 4.7 – Câmara Termográfica FLIR P640

Fonte: (FLIR Systems Inc., 2010a)

A câmera termográfica existente no LREC é da marca FLIR, modelo P640, figura 4.7 e possui as características apresentadas na tabela 4.3. Além destas é importante referir que esta câmara permite ajustar a paleta de cores, a mistura e fusão de imagens, no visível, com infravermelho, a emissividade, a compensação da temperatura de fundo refletida e permite a correção de uma imagem, antes de a armazenar. Este modelo disponibiliza igualmente um apontador laser, visível na imagem de infravermelho, que facilita a localização precisa do objeto a inspecionar.

Tabela 4.3 – Características da Câmera Termográfica FLIR P640.
Adaptado: (FLIR Systems Inc., 2010a).

Marca: FLIR	Modelo: P640
Resolução	640 × 480
Total de pixéis	307,200
Sensibilidade Térmica (NETD)	<0.03°C
Precisão de medição de Temperatura	± 2% ou 2°C
Gama de medição de Temperatura	-40°C to 500°C
Opções de Lentes	Standard: 24° × 18°; Optional: 45°, 12°, 7°; Close-up: 50 µ, 25 µ
Zoom	1-8 Contínuo digital
Focar	Auto & Manual
Tipo de Detetor	Uncooled Microbolometer

4.3.1 CARATERIZAÇÃO DO SOFTWARE FLIR TOOLS

O *software FLIR Tools* é uma ferramenta projetada para fornecer uma plataforma simples que permite atualizar a câmara e criar relatórios de inspeção. Este *software* permite, importar as imagens da câmara para o computador, agrupá-las visível/infravermelho e criar relatórios pré-formatados para além de todos os outros parâmetros básicos, como é o caso do ajuste da escala de temperaturas, da paleta de cores, da emissividade, etc., apresentados na figura 4.8.

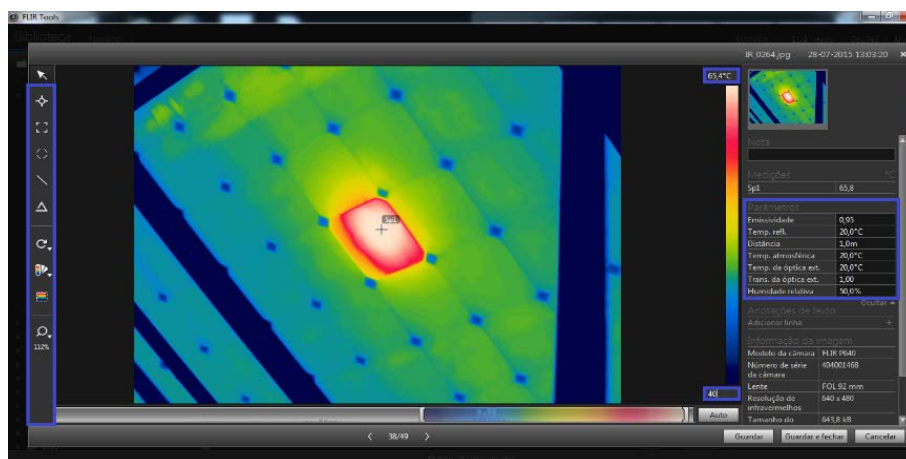


Figura 4.8 – Ambiente de trabalho da ferramenta FLIR Tools a uma imagem termográfica.

Esta ferramenta permite igualmente saber a temperatura máxima, mínima e média, em toda a área da imagem ou, de partes selecionadas, a partir das funções disponibilizadas, no lado esquerdo da figura 4.8, e, permite exportar os dados em formato CSV (Excel) e posteriormente construir gráficos.

4.4 INSTALAÇÕES FOTOVOLTAICAS ANALISADAS

Os procedimentos efetuados neste capítulo, como já foi referido, tiveram como objetivo: o acompanhamento à manutenção realizada às instalações fotovoltaicas isoladas do LREC. No âmbito do acompanhamento à

manutenção dos sistemas *híbridos* renováveis isolados, apoiados pelo LREC, propôs-se a utilização, da câmara termográfica existente, permitindo assim, a deteção de defeitos em módulos fotovoltaicos. Segue-se uma breve descrição às instalações visitadas.

4.4.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DO POSTO FLORESTAL DOS ESTANQUINHOS

Esta instalação foi projetada, colocada em funcionamento e englobada na rede de instalações híbridas (fotovoltaica-eólica), em 2002 e teve como principal objetivo: alimentar alguns postos florestais isolados, da ilha da Madeira. O Posto Florestal dos Estanquinhos, figura 4.9, atualmente vigiado por dois guardas florestais, em permanência, e é apenas alimentado pela parte fotovoltaica.



Figura 4.9 – Instalação fotovoltaica de fornecimento de energia ao Posto Florestal dos Estanquinhos.

Dos componentes desta instalação fotovoltaica apenas, dezasseis módulos solares policristalinos BP 275, com uma potência instalada de 1200 W, se mantêm em funcionamento desde a sua instalação. O aerogerador e a torre de suporte foram destruídos, por ventos muito fortes e, devido às descargas elétricas provenientes de relâmpagos, o sistema elétrico e eletrónico foi igualmente afetado. Posteriormente, o banco de baterias também foi igualmente substituído por um com iguais características, figura 4.10.



Figura 4.10 - Constituintes da nova/antiga instalação fotovoltaica isolada do Posto Florestal dos Estanquinhos.

Esta instalação foi uma das instalações, onde foi possível utilizar a câmara termográfica, no apoio à verificação e manutenção das mesmas. Numa primeira abordagem de verificação da existência de falhas foi possível detetar células quebradas e consequentes pontos quentes, como é visível na figura 4.11.



Figura 4.11 – Células fotovoltaicas quebradas na instalação dos Estanquinhos.

Com recurso à câmara termográfica foi possível constatar que, relativamente ao painel apresentado no lado esquerdo da figura anterior, a temperatura do *hot-spot* atinge os 100 °C, conforme é visível na figura 4.12, fenómeno conhecido por *hot-spot* ou ponto quente.

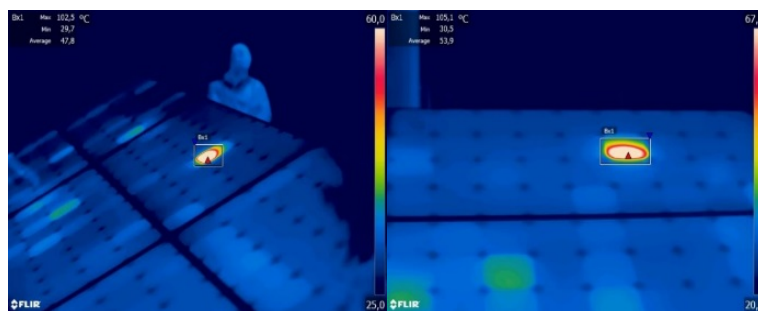


Figura 4.12 – Célula fotovoltaica danificada e consequente ponto quente na instalação dos Estanquinhos.

Por fim, a figura 4.13 e a figura 4.14 apresentam outras perspetivas de defeitos existentes nesta instalação. A primeira figura estabelece uma relação entre os defeitos observados visivelmente e posteriormente comprovados através da imagem termográfica correspondente, e, a segunda figura demonstra a relação entre, a imagem frontal e a traseira, referentes ao mesmo conjunto de painéis. É, igualmente possível, retirar desta última imagem, a constatação de inexistência de defeitos, nas caixas de junção, entre módulos.

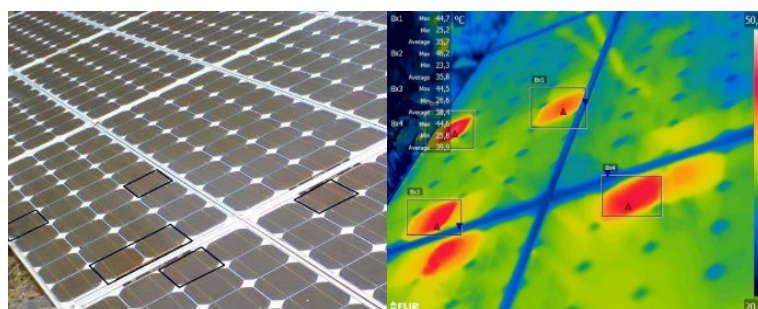


Figura 4.13 – Detecção visual e termográfica das células fotovoltaicas danificadas na instalação PV dos Estanquinhos.

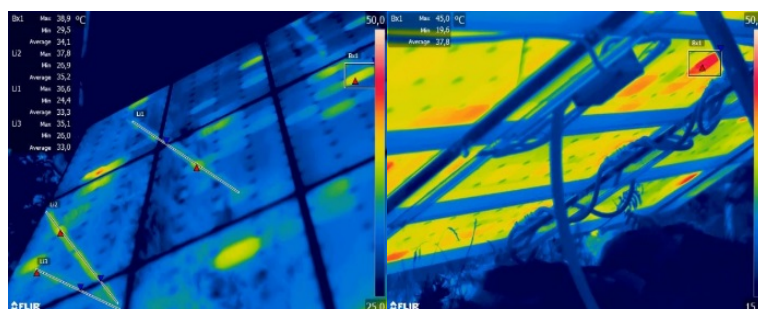


Figura 4.14 – Imagem termográfica frontal e traseira da instalação fotovoltaica dos Estanquinhos.

4.4.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DO POSTO FLORESTAL DA COVA GRANDE

Este sistema fotovoltaico entrou em funcionamento, no ano de 2006 e, destina-se a fornecer eletricidade à casa florestal da Cova Grande, figura 4.15, que possui dois guardas florestais, em permanência.



Figura 4.15 – Instalação fotovoltaica isolada de fornecimento de energia elétrica ao Posto Florestal da Cova Grande.

Esta instalação é composta por dezasseis módulos solares policristalinos BP 380U perfazendo uma potência instalada de 1280 W, com inversor Studer 3300 W, regulador de carga Trace 24V/30A e um pack de doze baterias estacionárias de chumbo-ácido de 2V 750Ah/100h, figura 4.16.



Figura 4.16 – Constituintes da instalação fotovoltaica isolada da Cova Grande.

Nesta instalação também foi possível utilizar a câmara termográfica, no apoio à verificação e manutenção da mesma. Numa primeira abordagem, de verificação da existência de defeitos nos módulos fotovoltaicos, foi de considerável dificuldade, realizar este procedimento, devido à tecnologia das células ser multicristalina /policristalina, como é visível na figura 4.17.

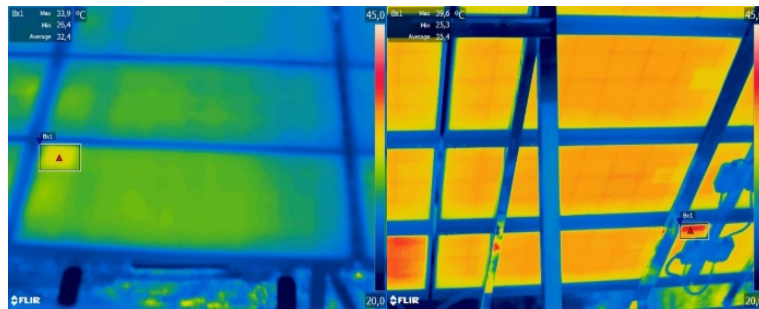


Figura 4.17 - Imagem termográfica frontal e traseira de uma célula a analisar na Cova Grande.

Através da utilização da câmara termográfica, nesta instalação, foi possível detetar um problema na caixa de conexão, entre os módulos fotovoltaicos, conforme é possível visualizar na figura 4.18, onde se encontra, no seu interior, os díodos *bypass* que protegem as fileiras ou módulos em casos de sombreamento parcial. Este problema está relacionado com o facto de que, esta caixa de conexão estar a ser utilizada, apenas para passagem de energia, uma vez que, o painel está desconectado por forma a garantir bom funcionamento da instalação. Este painel teve de ser desligado devido ao painel paralelo ter queimado.

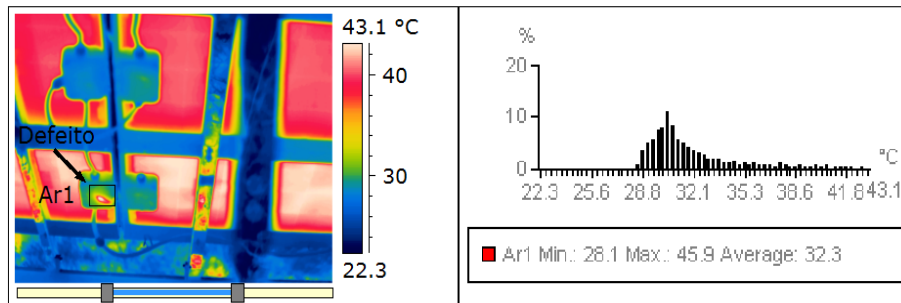


Figura 4.18 – Detecção de má ligação entre módulos fotovoltaicos na instalação da Cova Grande.

Nesta instalação foi realizada a reposição de eletrólito, no banco de baterias, para o nível máximo e, verificou-se igualmente, a presença de algum alarme acionado, no regulador de tensão, no inversor e dos níveis de carga, da instalação.

4.4.3 SISTEMA SOLAR DE FINS MÚLTIPLOS DA QUINTA PEDAGÓGICA DOS PRAZERES

Esta instalação fotovoltaica foi projetada, para integrar um sistema solar de fins múltiplos, destinado à secagem de ervas aromáticas e frutas. Este sistema fotovoltaico tem como principal função: fornecer energia para alimentar o ventilador, que insufla o ar proveniente do coletor solar, a ar, com 10 m² para o interior do secador solar. Na figura 4.19 é apresentado o sistema fotovoltaico composto por dezasseis painéis BP Solar 380U, perfazendo 1280W de potência instalada, dois reguladores de carga Trace 24V/30A, o inversor Studer SI 2324 – 24V de 2300W e o pack de doze baterias estacionárias HOPPECKE de 2v 1200 Ah/100h.



Figura 4.19 - Instalação fotovoltaica de fornecimento de energia ao Secador Solar da Quinta P. dos Prazeres.

A Quinta Pedagógica dos Prazeres foi o último local, onde nos foi possível utilizar a câmara termográfica, do LREC. Nesta quinta, para além do sistema solar de fins múltiplos, utilizado na secagem de ervas aromáticas e frutas, existem outras três instalações, em regime de miniprodução. Foi possível detetar nestas instalações, algumas células com defeito e alguma sujidade nas mesmas, conforme é visível na figura 4.20.

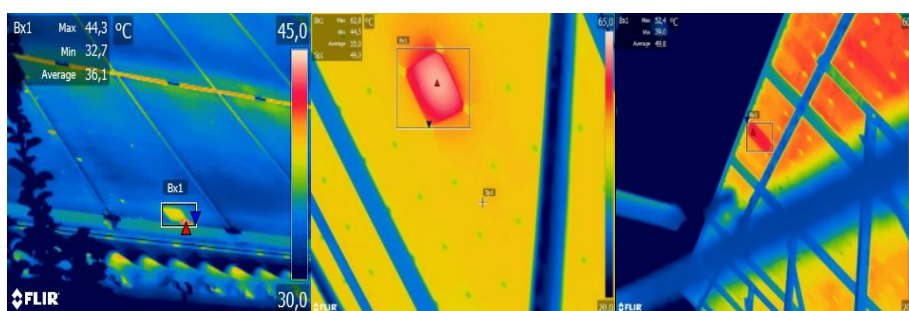


Figura 4.20 – Inspeção termográfica às instalações de miniprodução da Quinta Pedagógica dos Prazeres.

No que diz respeito, à instalação solar de fins múltiplos, em termos de deteção de problemas nos módulos fotovoltaicos, através da utilização da câmara termográfica, foram detetadas algumas células que necessitam de ser inspecionadas, com detalhe, numa próxima visita. No circuito de transporte de ar quente, para o secador solar, existe um motor que auxilia a entrada do ar e que pode ser regulado o seu funcionamento, com recurso a um regulador de velocidade. Foi detetado a sua avaria, devido à oxidação dos seus componentes, conforme é visível na figura 4.21.



Figura 4.21 – Regulador de velocidade para motores CA 1/2CV 375W 220V oxidado.

Posteriormente foi solicitada a observação do sistema solar de termossifão, ali existente, onde nos foi possível detetar alguns problemas dramáticos desde, na estrutura de suporte do depósito, na estrutura de fixação da proteção (ânodo de magnésio) e na resistência blindada, em cobre e verificou-se ainda, a falta de espaço, para a reposição do fluido térmico, do circuito primário, conforme é visível na figura 4.22.



Figura 4.22 – Inspeção ao sistema térmico de termossifão da Quinta Pedagógica dos Prazeres.

4.4.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DA CASA DE ABRIGO DO PICO RUIVO

Este sistema fotovoltaico isolado foi instalado para fornecer energia elétrica à Casa de Abrigo do Pico Ruivo. Atualmente funciona, apenas, como casa de apoio aos utilizadores dos percursos pedestres em direção ao Pico Ruivo, ponto mais alto da ilha, com 1862 m. Nesta casa trabalham e pernoitam alternadamente (semanalmente) três funcionários. Na figura 4.23 é apresentado algumas características do sistema fotovoltaico isolado aqui existente, a destacar os quatro painéis KYOCERA de 125 W, que perfazem uma potência instalada de 500W, um inversor Alessi 550i-12, um regulador Morningstar ProStar-30 e quatro baterias seladas 12 v.



Figura 4.23 – Sistema fotovoltaico isolado de fornecimento de energia à Casa de Abrigo do Pico Ruivo.

O LREC foi contactado, pelos trabalhadores da Casa de Abrigo do Pico Ruivo devido à falha do sistema energético fotovoltaico isolado, de fornecimento de energia elétrica, à casa de abrigo. Foi então necessário deslocarmo-nos, com urgência ao local, enfrentando um percurso pedestre de 1 hora, de forma a tentar solucionar o problema. No entanto, não nos foi possível solucionar, no local, e tivemos de levar o inversor, até o LREC. Após a análise, do manual de utilizador deste inversor, onde são indicados os erros mais comuns, as possíveis causas e soluções, para cada um dos erros apresentado, foi possível determinar, pela sequenciação do piscar dos leds, que era um erro de sobrecarga na saída. Substituiu-se o fusível queimado e confirmou-se, o bom funcionamento do inversor, em termos de tensão de saída e respetiva frequência, conforme é apresentado na figura 4.24.

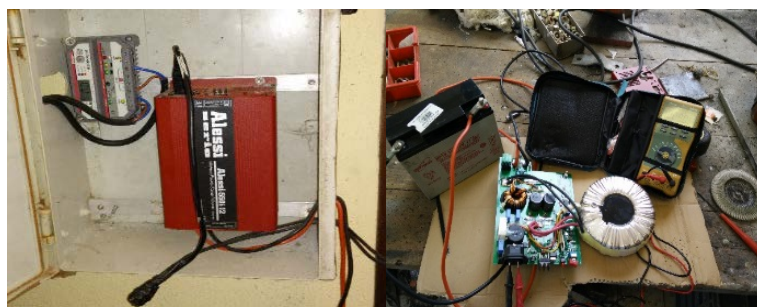


Figura 4.24 – Detecção da falha, correção e verificação do bom funcionamento do inversor.

4.4.5 SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO DA CASA DO BURRO

Este sistema fotovoltaico isolado foi instalado, em 2007, para fornecer energia elétrica à Casa do Burro, englobava a rede de instalações híbridas (fotovoltaica-eólica), no entanto, posteriormente, o aerogerador foi retirado. Na figura 4.25 é apresentado algumas características do sistema fotovoltaico isolado aqui existente, de destacar o sistema fotovoltaico, composto por dezasseis módulos fotovoltaicos multicristalino KYOCERA Kc80, perfazendo uma potência instalada de 1280 Wp, um inversor Studer Compact C-2600-24, dois reguladores Morningstar ProStar-30 e doze baterias HOPPECKE OPzS-2V, com capacidade de 1500 Ah.



Figura 4.25 – Sistema fotovoltaico isolado de fornecimento de energia elétrica à Casa do Burro.

Esta instalação encontra-se bastante danificada, devido aos incêndios que ocorreram no local, nos anos de 2010 e 2012, afetando algumas fileiras de módulos fotovoltaicos, a instalação elétrica e respetivo regulador de tensão, visível na figura 4.26. Foi ainda realizado, nesta instalação, a reposição do eletrólito nas baterias.



Figura 4.26 – Painéis fotovoltaicos afetados pelos incêndios de 2010 e 2012 na Casa do Burro.

4.5 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No âmbito deste estágio foram realizadas algumas visitas de acompanhamento à manutenção de alguns sistemas fotovoltaicos isolados e de fins múltiplos onde foi possível verificar que após uma década de funcionamento, a maioria dos sistemas fotovoltaicos encontram-se consideravelmente degradados.

A utilização da termografia permitiu verificar um grande número de módulos fotovoltaicos com pontos quentes que, reduzem a produção destes sistemas, o que origina as sucessivas falhas de fornecimento de energia às casas florestais e aos postos florestais. A termografia é um método rápido e eficaz, na deteção e análise de defeitos, em células e módulos fotovoltaicos, em circuitos elétricos e outros componentes eletrónicos. Através das imagens é possível observar a temperatura, em cada ponto da imagem, constituindo assim, um método de análise eficaz e preciso (localização exata), visto a temperatura das células ou, em todo o módulo, a funcionar corretamente, deve ser uniforme. A ocorrência de defeitos localizados faz aumentar a temperatura nesses locais, fenómeno denominado por ponto quente. O sombreamento parcial ou total dos módulos também produz sobreaquecimento podendo igualmente num futuro, dado a prevalência do mesmo, originar defeitos nos equipamentos.

Assim, no acompanhamento às visitas de manutenção, foi possível constatar:

- Fenómeno de sobrecarga do inversor, na instalação fotovoltaica isolada, da Casa de Abrigo do Pico Ruivo, que afetou somente o fusível de saída e, que, após a sua deteção, foi fácil, a sua resolução;
- A incorreta instalação da estrutura de suporte, do depósito do sistema solar térmico da Quinta Pedagógica dos Prazeres, repercutiu-se em danos acentuados no mesmo, proporcionando fugas e degradação do isolamento. Não foi igualmente considerada uma área livre para a manutenção do mesmo;
- Relativamente às instalações fotovoltaicas isoladas foram detetados diversos pontos quentes, assim como células quebradas;
- A manutenção promovida é de apenas reposição de eletrólito, nas baterias;
- Muitas falhas de fornecimento de energia às casas florestais e aos postos florestais.

É perentório realizar um relatório detalhado do estado de funcionamento destes sistemas e do seu estado de degradação para seja definida uma manutenção e renovação destas instalações.

5 CONCLUSÕES

Este relatório de estágio aborda a evolução do Sistema Electroprodutor da ilha da Madeira na última década, apresenta um estudo pormenorizado sobre a distribuição da radiação solar global a partir dos registos efetuados por estações meteorológicas automáticas existentes na região e, envolve ainda, uma breve descrição acerca do estado de funcionamento e das operações de manutenção de alguns sistemas fotovoltaicos isolados na Madeira.

Neste capítulo são enumeradas as principais conclusões sobre as temáticas abordadas ao longo deste trabalho. Começo por expor as considerações finais acerca do Sistema Electroprodutor da ilha da Madeira, apresentado no Capítulo 2. Em seguida, é abordado o enquadramento da distribuição geográfica da radiação solar no arquipélago da Madeira através dos registos de estações meteorológicas automáticas, apresentado no Capítulo 3. Por último, são tecidas algumas conclusões acerca das operações de manutenção de alguns sistemas fotovoltaicos isolados e de fins múltiplos, descritas ao longo do Capítulo 4.

5.1 SISTEMA ELECTROPRODUTOR DA ILHA DA MADEIRA

No ano de 2005, a representatividade das fontes de energia renovável no sistema electroprodutor da ilha da Madeira foi de 15,7% da energia elétrica total produzida, correspondendo a 136,5 GWh, enquanto as fontes não renováveis corresponderam a 727,4 GWh, representando os restantes 84,3%. A energia renovável foi proveniente de uma potência hídrica instalada de 74 MW, seguida da eólica com 10 MW e da valorização energética dos resíduos sólidos urbanos (VERSU) com 8 MW.

No ano de 2015, a representatividade das FER atingiu os 25,7% de energia elétrica total produzida, correspondendo a 828,2 GWh, representando, um crescimento de 10% da produção global numa década, ou seja, uma taxa anual de crescimento de 1%. Em 2015 a potência hídrica instalada alcançava os 50,7 MW, seguida da eólica, com 45,1 MW, a fotovoltaica com aproximadamente 20 MW e o SVERSU, com 8 MW. Este crescimento deveu-se essencialmente à forte implementação de sistemas fotovoltaicos e eólicos. Neste mesmo período verificou-se uma redução de 15,1% da energia elétrica produzida pelas centrais termoelétricas da ilha e, uma redução de 23,6%, da energia elétrica produzida pelas centrais hídricas.

A meta definida no PAES para as fontes de energia renováveis, em 2020, é de 50% da energia elétrica produzida e, para tal, estão colocados em marcha dois projetos: um de investigação, Estudo da Viabilidade da Energia Geotérmica Estimulada na Madeira e outro em implementação, a Ampliação do Aproveitamento Hidroelétrico da Calheta. Esta ampliação terá um impacto na capacidade de produção de energia elétrica, de 30 MW e permitirá a construção de um parque eólico de 25 MW. Outra das metas definidas no PAES é a redução das emissões de CO₂, em 20%, em relação a 2005, ano em que foram emitidas 526.241 tCO₂e. Em 2015 foram emitidas 380.817 tCO₂e, o que representa uma redução de 28%, correspondendo a um fator de emissões específicas do sistema electroprodutor da ilha da Madeira de 460 gCO₂/kWh.

Em 2014 foi efetuada a introdução do gás natural na Central Térmica da Vitória que teve um papel importante na adaptação do sistema electroprodutor às metas de redução das emissões de CO₂. Desde a sua introdução, já foi evitada a emissão de 73.000 tCO₂e e a poupança de 124 milhões de litros de fuelóleo.

Muito embora a potência fotovoltaica instalada na ilha da Madeira apresente um crescimento médio anual de 4%, desde 2011, esta fonte de energia reúne condições para que este crescimento seja superior.

5.2 ESTUDO DA RADIAÇÃO SOLAR NO ARQUIPÉLAGO DA MADEIRA

Foi efetuado um tratamento e análise aos registos diários da Irradiação Solar Global nas duas redes de estações meteorológicas existentes no arquipélago, a rede de EMAs LREC e a rede de EMAs IPMA, no período compreendido entre o primeiro mês completo de envio de dados e o mês de agosto de 2015. Foram utilizados os registos de dez estações meteorológicas da rede do LREC, nove na ilha da Madeira (LREC, Trapiche, Parque Ecológico do Funchal, Bica da Cana, Encumeada, Machico, Pico das Pedras, Porto Moniz, Prazeres e Pico Verde) e uma nas Ilhas Desertas (Deserta Grande), e dezassete estações meteorológicas da rede IPMA, dezasseis na ilha da Madeira (Observatório, Lido, Chão do Areeiro, Pico Alto, Aeroporto Santa Catarina, Ponta de São Lourenço, Santo da Serra, Quinta Grande, Lugar de Baixo, Bica da Cana, Ponta do Pargo, Porto Moniz, Achadas da Cruz, São Vicente, Ponta de São Jorge e Santana) e uma, na Ilha do Porto Santo (Aeroporto do Porto Santo), compreendendo um total de 27 estações meteorológicas.

A análise da variação da Irradiação Solar Global Diária, em cada uma das estações das duas redes, permitiu concluir o seguinte:

- a) A Irradiação Solar Global anual disponível é superior a 1500 kWh/m² em seis estações da ilha da Madeira, da rede LREC: Bica da Cana com 1837 kWh/m², Pico Verde com 1802 kWh/m², LREC com 1687 kWh/m², Prazeres com 1590 kWh/m², PE do Funchal com 1572 kWh/m² e Machico com 1545 kWh/m²;
- b) A Irradiação Solar Global anual disponível é inferior a 1500 kWh/m² em quatro estações da ilha da Madeira da rede LREC, Encumeada com 1389 kWh/m², Pico das Pedras com 1360 kWh/m², Trapiche com 1333 kWh/m² e Porto Moniz com 1307 kWh/m² e, uma estação nas Ilhas Desertas com 1333 kWh/m²;
- c) O valor mais alto da Irradiação Solar Global Diária da rede LREC é observado na Bica da Cana, no mês de julho, e o mais baixo, na EMA do Porto Moniz, no mês de dezembro;
- d) A Irradiação Solar Global anual disponível nas EMAs da rede IPMA é superior a 1500 kWh/m² em nove estações da ilha da Madeira, Ponta do Pargo com 1818 kWh/m², Chão do Areeiro com 1790 kWh/m², Lugar de Baixo com 1747 kWh/m², Observatório com 1632 kWh/m², Ponta de São Lourenço com 1623 kWh/m², Lido com 1622 kWh/m², Bica da Cana com 1621 kWh/m² e Lombo da Terça com 1536 kWh/m² e uma, na Ilha do Porto Santo (Aeroporto) com 1805 kWh/m²;
- e) A Irradiação Solar Global anual disponível nas EMAs da rede IPMA é inferior a 1500 kWh/m² em seis estações da ilha da Madeira, São Jorge com 1477 kWh/m², Quinta Grande com 1341 kWh/m², São Vicente com 1326 kWh/m², Santana com 1261 kWh/m², Porto Moniz com 1228 kWh/m² e Santo da Serra com 1103 kWh/m²;

- f) O valor mais alto da Irradiação Solar Global Diária da rede IPMA é observado no Chão do Areeiro, no mês de julho, e o mais baixo, no Porto Moniz, no mês de dezembro.

Foi igualmente realizada uma análise, por concelho, entre as estações da rede LREC e as da rede IPMA para permitir retirar mais elações sobre a distribuição geográfica da irradiação solar global. Uma vez que dentro da rede IPMA existem três EMAs (Aeroporto Santa Catarina, Pico Alto e Porto Moniz) com um funcionamento de apenas 8 meses (entre janeiro a agosto de 2015), foi igualmente realizada uma análise, entre estações do mesmo concelho, de forma a averiguar se, apresentam uma variação anual da irradiação solar global sensivelmente equidistante. Assim, desta etapa resultaram as seguintes conclusões:

- a) A EMA do Trapiche apresenta uma variação anual da ISGD inferior à expectável. O seu curto período de funcionamento, associado à elevada percentagem de lacunas de dias nos registos impossibilita uma análise mais aprofundada aos seus registos;
- b) A EMA do PE do Funchal embora presente, de igual forma que a EMA do Trapiche, uma elevada percentagem (superior a 20%) de lacunas de dias nos registos, após uma análise mais pormenorizada aos seus registos permitiu concluir que o seu sensor de radiação apresenta uma anomalia, uma vez que a partir de outubro de 2010 existe uma quebra na quantificação da radiação solar global. A quebra apresentada é, em média, de 659 Wh/m².dia, na fase negativa da declinação solar, e de 1974 Wh/m².dia, na fase positiva da declinação solar;
- c) A ausência de análise e tratamento dos registos da rede LREC é uma das causas da elevada percentagem de lacunas de dias nos registos desta rede. Outra das causas é o elevado período de ausência de tráfego de dados que impossibilitou o restabelecimento das comunicações entre as EMAs e o LREC.

Após a etapa anterior foi realizado um estudo comparativo entre a média anual da ISGD das EMAs, compreendendo os registos entre o primeiro mês completo de dados e agosto de 2015, com a correspondente média anual da ISGD na base de dados do PVGIS e do *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*. Os objetivos desta nova etapa foram a validação parcial da distribuição geográfica da radiação solar global na Madeira e a verificação da disparidade existente entre modelos de previsão de radiação solar global. Relativamente ao estudo comparativo entre a média anual da ISGD das EMAs e a correspondente média anual na base de dados do PVGIS, podemos concluir o seguinte:

- a) Os valores de ISGD apresentados pela base de dados do PVGIS são considerados “sobrevalorizados”. A razão pela qual os valores da ISGD desta base de dados são considerados “sobrevalorizados” deve-se ao facto de que na metodologia adotada para a sua construção, o procedimento de normalização dos valores obtidos a partir do modelo de céu-limpo apenas utilizar os registos de uma estação meteorológica local, quando para áreas com declives acentuados é necessário um maior número de estações meteorológicas, distribuídas de forma espacial heterogénea para que sejam obtidos bons resultados absolutos;

- b) Das EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD menor que a do PVGIS, com um desvio superior a 1000 Wh/m².dia, a EMA do Trapiche é a única que apresenta uma média anual da ISGD diferente da distribuição geográfica da radiação solar global expectável para o local.
- c) Das EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD menor que a do PVGIS, com um desvio inferior a 1000 Wh/m².dia, a EMA do PE do Funchal é única estação localizada a uma cota superior aos 1000 m. Como já foi referido anteriormente foi equacionada uma anomalia no sensor de radiação solar desta estação, a partir de agosto de 2010, razão pela qual foi igualmente incluído neste estudo a média anual da ISGD que apresentava antes dessa data. A média anual da ISGD apresentada pela EMA, antes da “origem” da anomalia, é muito próxima da indicada pela base de dados do PVGIS para o local, ainda que inferior.
- d) Das EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD maior que a do PVGIS, com um desvio inferior a 500 Wh/m².dia, apenas uma, a EMA da Ponta do Pargo, situa-se a uma cota inferior aos 1000 m. Esta estação situa-se na ponta mais ocidental da Madeira, com caraterísticas morfológicas, geográficas e atmosféricas que a capacitam de uma boa exposição solar.
- e) As caraterísticas morfológicas, geográficas e atmosféricas das EMAs associado à incerteza existente, quer aos valores apresentados pelas mesmas, quer aos valores apresentados pela base de dados do PVGIS, impossibilitaram um estudo mais pormenorizado ainda que tenha sido possível reconhecer uma distribuição geográfica da radiação solar.

Relativamente à comparação dos resultados da média anual da ISGD das EMAs com o correspondente no *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira* podemos concluir o seguinte:

- a) Das EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD menor que a correspondente no *Atlas da Radiação Solar*, com um desvio superior a 1000 Wh/m².dia, duas localizam-se na Madeira e uma nas Desertas. O desvio apresentado pelas EMAs localizadas na Madeira, Bica da Cana (IPMA) e Santo da Serra, deveu-se ao facto de que a resolução da malha utilizada na construção do *Atlas da Radiação Solar* não permitir identificar e quantificar áreas onde as caraterísticas morfológicas, geográficas e atmosféricas influenciam fortemente a incidência da radiação solar na superfície. No caso da estação localizada nas Desertas, Deserta Grande a principal razão para o desvio apresentado está associado à metodologia utilizada para a normalização dos valores obtidos de ISG a partir do modelo de céu-limpo, uma vez que, dada a inexistência de uma estação meteorológica local foram utilizados os registos já normalizados da Madeira e do Porto Santo.
- b) Das EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD menor que a correspondente no *Atlas da Radiação Solar*, com um desvio inferior a 750 Wh/m².dia, são de destacar duas EMAs, Trapiche e PE do Funchal que, dadas as suas caraterísticas morfológicas, geográficas e atmosféricas associadas à incerteza existente relativamente à distribuição geográfica da radiação solar global apresentada pelo *Atlas da Radiação Solar* apresentam dos desvios maiores. Como já foi referido anteriormente, a EMA do Trapiche apresenta um curto período de funcionamento que, associado à elevada percentagem de lacunas não permite que seja realizado um estudo mais pormenorizado dos seus registos e consequente análise

global da incidência de radiação solar neste local. Ainda assim este estudo comparativo corrobora com a necessidade de um estudo mais abrangente a este local.

Relativamente à EMA do PE do Funchal, já foi igualmente detetado que esta estação possui uma anomalia no seu sensor de radiação solar pois apresenta uma quebra na quantificação da radiação solar global a partir de agosto de 2010. Posto isto, foi incluído neste estudo comparativo, a média anual da ISGD que esta EMA apresentava antes de agosto de 2010, de forma a permitir uma análise comparativa, com dados mais realistas, desta estação. O desvio apresentado foi ainda assim negativo mas muito próximo do intervalo da média anual da ISGD correspondente para o local no *Atlas da Radiação Solar*.

No que diz respeito às restantes estações, que apresentam um desvio enquadrado neste intervalo, a influência conjunta da incerteza associada aos registos das EMAs e à distribuição geográfica da radiação solar global no *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira* não permite uma análise mais pormenorizada acerca dos resultados obtidos, ainda assim, podemos constatar a influência que as características morfológicas, geográficas e atmosféricas do local provocam nos desvios apresentados pelas EMAs em estudo.

- c) As EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD maior que a correspondente no *Atlas da Radiação Solar*, com um desvio inferior a $300 \text{ Wh/m}^2\cdot\text{dia}$, apresentam características morfológicas, geográficas e atmosféricas favoráveis a uma boa exposição solar. A quase totalidade das estações que apresentam uma média anual superior à atribuída pelo Atlas situa-se no lado sul da ilha, três das quais, localizam-se a uma cota superior aos 1000 m, três no concelho do Funchal, três em locais próximos da linha costeira e, apenas uma localiza-se no lado norte, a uma cota superior aos 900 m.

Assim, deste capítulo podemos concluir que o recurso solar no arquipélago da Madeira é muito variável, em particular na ilha da Madeira, uma vez que a orografia bastante acidentada, bem como a exposição aos ventos predominantes de Norte, fazem com que na ilha existam diversos microclimas que influenciam a radiação solar que chega à superfície através da variação em altitude dependente de camadas nebulosas, e da própria obstrução do horizonte particular a cada local. Por análise aos registos das duas redes de estações meteorológicas foi possível concluir que, mais de 60% das estações apresenta uma disponibilidade anual superior a 1500 kWh/m^2 e que, existem duas estações meteorológicas que apresentam um funcionamento incoerente. No caso da EMA do Trapiche não foi possível realizar um estudo mais pormenorizado aos seus registos, no entanto, no caso da EMA do PE do Funchal foi possível detetar que o seu sensor de radiação solar possui uma anomalia (a partir de agosto de 2010) que se traduz numa quebra expressiva da ISGD (em média, 23% na fase negativa da declinação solar e 32% na fase positiva da declinação solar).

Relativamente ao estudo comparativo realizado entre os valores de ISGD das EMAs e os indicados por dois modelos semelhantes de previsão, a base de dados do PVGIS e o *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*, podemos concluir que os resultados apresentados são razoáveis, dadas as limitações que tiveram na sua construção. No caso da base de dados do PVGIS, embora a resolução do modelo de céu-limpo utilizado fosse a apropriada, os resultados obtidos ainda necessitam de ser normalizados por registos de estações meteorológicas locais, distribuídas de forma espacial heterogénea. Nesta situação apenas dispuseram dos

registos de apenas uma estação meteorológica, para que fossem obtidos bons resultados absolutos, principalmente em áreas com declives acentuados. No caso do *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira*, a resolução do modelo de céu-limpo utilizado era grosseira, não permitindo a obtenção de um mapa com a distribuição geográfica da radiação solar global mais pormenorizado, ainda que, à data, dispusessem dos registos de seis estações meteorológicas bem distribuídas, número ainda insuficiente para áreas com as características da Madeira.

Um estudo pormenorizado e fundamentado da disponibilidade da radiação solar no arquipélago da Madeira e uma nova política de comunicação afigura-se então como um forte mecanismo de incentivo, aos cidadãos e às empresas, na implementação de sistemas térmicos e fotovoltaicos na região. Desde 2000 que o LREC gere os sistemas fotovoltaicos isolados e com fins múltiplos de produção de eletricidade do Projeto PAUER que surgiu com o objetivo de disseminar novas tecnologias e o aproveitamento de recursos *híbridos* renováveis. Assim, foram instalados sistemas híbridos (fotovoltaicos e eólicos) para alimentar eletricamente Casas Florestais e Postos de Vigia isolados no arquipélago.

5.3 MANUTENÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS

No âmbito deste estágio foram realizadas algumas visitas de acompanhamento à manutenção desses sistemas onde foi possível verificar que após uma década de funcionamento, a maioria dos sistemas fotovoltaicos encontram-se consideravelmente degradados. A utilização da termografia permitiu verificar um grande número de módulos fotovoltaicos com pontos quentes que, reduzem a produção destes sistemas, o que origina falhas de fornecimento de energia às casas florestais e postos florestais. É perentório realizar um relatório detalhado do estado de funcionamento destes sistemas e do seu estado de degradação para seja definida uma manutenção e renovação destas instalações.

5.4 TRABALHOS FUTUROS

Relativamente à Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do LREC, rede de EMAs LREC, é necessário no futuro diminuir a percentagem de falhas de funcionamento e realizar um pré-tratamento dos dados provenientes das EMAs a fim, de serem precocemente detetadas quebras significativas na quantificação da radiação solar. Assim, seguem-se algumas linhas de trabalho que podem ser equacionadas:

- Alteração da programação de gravação dos registos das EMAs, de forma a resolver as falhas identificadas neste trabalho e facilitar, no futuro, o tratamento dos mesmos;
- Construção de uma ferramenta que permita analisar todas as variáveis medidas pela EMA (Variação Mensal e Anual) e facilitar a construção de relatórios mensais dos parâmetros analisados;
- Utilização de uma estação meteorológica móvel com todos os sensores calibrados para efetuar uma inspeção de quantificação do estado de funcionamento das EMAs, sendo a EMA do Parque Ecológico do Funchal a prioritária;
- Elaboração de um estudo pormenorizado da radiação solar, por concelho, no arquipélago da Madeira e do tipo influências existente (fenómenos atmosféricos microclimáticos);
- Disponibilização dos parâmetros analisados pelas EMAs online.

No que diz respeito, às instalações fotovoltaicas isoladas, geridas pelo LREC, é necessário realizar uma inspeção profunda a todos os equipamentos. Seguem-se algumas propostas de trabalhos que podem ser equacionadas:

- Realização de um diagnóstico detalhado dos sistemas fotovoltaicos isolados;
- Desenvolvimento de um Plano de Manutenção Preventiva e Preditiva;
- Estudo termográfico pormenorizado dos sistemas fotovoltaicos existentes;
- Desenvolvimento de um Plano de Reformulação dos sistemas fotovoltaicos isolados;
- Disponibilização da produção online.

6 BIBLIOGRAFIA

- Agência Portuguesa do Ambiente. (2015). Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas (NIR 2015 - emissões 2013). Portugal. Retrieved from http://www.apambiente.pt/_zdata/Inventario/memo_emisses_PT_20151030.pdf
- Águas e Resíduos da Madeira, S. A. (2015a). *Estação de Tratamento de Água de Santa Quitéria*. Funchal. Retrieved from [http://www.aguasdamadeira.pt/Portals/0/Documentos/Instalações/ETA Santa Quitéria.pdf](http://www.aguasdamadeira.pt/Portals/0/Documentos/Instalações/ETA_Santa_Quitéria.pdf)
- Águas e Resíduos da Madeira, S. A. (2015b). Sistema de abastecimento de água aos municípios. Retrieved January 10, 2016, from <http://www.aguasdamadeira.pt/Águas/Águapotável/Abastecimentoaosmunicipios.aspx#.VvQDpeJklU>
- Amillo, A. M. G. (2013). Climatic data requirements for solar energy resource assessment, experience from PVGIS. *2nd EURO4M USER WORKSHOP*.
- AREAM, DRCIE, & EEM S.A. (2012). *Plano de ação para a energia sustentável. Pact of Islands*. Funchal. Retrieved from http://drcie.gov-madeira.pt/drcie/index.php?option=com_content&view=article&id=408&Itemid=842
- ATKINS. (2014). *Estudo de Impacte Ambiental do Projeto de Ampliação do Aproveitamento Hidroelétrico da Calheta*. Funchal. Retrieved from http://www.sra.pt/files/PDF/2014/DROTA/Volume1_Relatorio_Base.pdf
- Atlantic Island Electricity (AIE). (2015). Central Térmica da ZFI recebeu certificação SGAS. Retrieved February 28, 2016, from <http://ibc-madeira.com/pt/noticias/noticias/203-central-termica-da-zfi-recebeu-certificacao.html>
- Borrego, C., Lopes, M., Ribeiro, I., Carvalho, A., & Miranda, A. I. (2010). As alterações climáticas: uma realidade transformada em desafio. *Captar*, 2, 1–16. Retrieved from <http://revistas.ua.pt/index.php/captar/article/view/2731/2581>
- Cano, D., Monget, J. M., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., & Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37(1), 31–39. [http://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90104-0](http://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90104-0)
- Cebecauer, T., & Suri, M. (2015). Typical Meteorological Year Data: SolarGIS Approach. *Energy Procedia*, 69, 1958–1969. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.195>
- CMAF/UL. (2010). As Sombras do Tempo. Retrieved February 2, 2016, from <http://sombbrasdotempo.org/funcionamento/>
- Costa, A. S. da. (2015). *O Panorama da Eletricidade Renovável em Portugal*. Évora. Retrieved from http://www.apren.pt/fotos/editor2/sa_da_costa_apren_diadosol_evora_4_mai_2015.pdf
- Coulson, K. (2012). *Solar and Terrestrial Radiation: Methods and Measurements*. Retrieved from <https://books.google.com/books?hl=pt-PT&lr=&id=PsKQCHV7Rq8C&pgis=1>
- Coulson, K. L. (1971). On the solar radiation field in a polluted atmosphere. *Journal of Quantitative*

- Spectroscopy and Radiative Transfer*, 11(6), 739–755. [http://doi.org/10.1016/0022-4073\(71\)90051-3](http://doi.org/10.1016/0022-4073(71)90051-3)
- Darnell, W. L., Staylor, W. F., Gupta, S. K., & Denn, F. M. (1988). Estimation of Surface Insolation Using Sun-Synchronous Satellite Data. *Journal of Climate*, 1(8), 820–835. [http://doi.org/10.1175/1520-0442\(1988\)001<0820:EOSIUS>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0442(1988)001<0820:EOSIUS>2.0.CO;2)
- Dedieu, G., Deschamps, P. Y., & Kerr, Y. H. (1987). Satellite Estimation of Solar Irradiance at the Surface of the Earth and of Surface Albedo Using a Physical Model Applied to Meteosat Data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 79–87.
- DEM do Instituto Superior Técnico. (2004). Energia Fotovoltaica - Manual sobre tecnologias, projeto e instalação. Portugal. Retrieved from http://moodle.ciencias.ulisboa.pt/pluginfile.php/2697/mod_folder/content/0/6_-_systems/manual_instalacao_fotovoltaico.pdf?forcedownload=1
- Diagne, H. M., David, M., Lauret, P., & Boland, J. (2012). Solar irradiation forecasting: state-of-the-art and proposition for future developments for small-scale insular grids. *World Renewable Energy Forum 2012*, 1–8. Retrieved from https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0617_full paper.pdf
- Diagne, H. M., David, M., Lauret, P., & Boland, J. (2013). Solar irradiation forecasting: state-of-the-art and proposition for future developments for small-scale insular grids. *World Renewable Energy Forum 2012*, (January 2016), 1–8. Retrieved from https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pdf/SOLAR2012_0617_full paper.pdf
- Duffie, J. a., Beckman, W. a., & Worek, W. M. (2003). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. *Journal of Solar Energy Engineering* (Vol. 116). <http://doi.org/10.1115/1.2930068>
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (1953). *Caraterização da Central Hidroeléctrica da Serra de Água*. Funchal. Retrieved from <https://www.eem.pt/media/68391/ctserraagua.pdf>
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (1965). *Caraterização da Central Hidroeléctrica da Ribeira da Janela*. Funchal. Retrieved from <https://www.eem.pt/pt/conteudo/sistema-elétrico/produção/centrais-hidroelétricas/central-da-ribeira-da-janela/>
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (1978a). *Caraterização da Central Hidroeléctrica da Calheta*. Funchal. Retrieved from <https://www.eem.pt/media/99002/ctcalheta.pdf>
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (1978b). *Caraterização da Central Hidroeléctrica da Fajã da Nogueira*. Funchal. Retrieved from <https://www.eem.pt/media/99005/ctfnogueira.pdf>
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (1992). *Caraterização da Central Hidroeléctrica da Calheta de Inverno*. Funchal. Retrieved from <https://www.eem.pt/media/63684/ctcalhetainverno.pdf>
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (2003). *Caraterização da Central Hidroeléctrica dos Socorridos*. Funchal. Retrieved from <https://www.eem.pt/media/99008/ctsocorridos.pdf>
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (2014a). *Caraterização do Sistema Elétrico da Ilha da Madeira - SEPM*. Funchal. Retrieved from <http://www.eem.pt/pt/conteudo/sistema-el%C3%A9trico/>
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (2014b). *Relatório e Contas da Empresa de Eletricidade da Madeira*. Funchal. Retrieved from <http://www.bportugal.pt/pt-PT/BdP> Contas

- Oficiais/FT3160_D090324_H142510-3160-CAI-200812-CAI.pdf
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (2016a). *Evolução mensal do mix de produção e das emissões de CO2 (2015)*. Funchal. Retrieved from https://www.eem.pt/media/213619/evol_mad_2015.pdf
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (2016b). *Projetos Recentes/Em Curso*. Retrieved January 10, 2016, from <https://www.eem.pt/pt/conteudo/eem/projetos-recentesem-curso/>
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (2016c). *Rotulagem de Energia Elétrica na EEM*. Retrieved January 20, 2016, from <https://www.eem.pt/pt/conteudo/sustentabilidade/rotulagem-de-energia-el%C3%A9ctrica/>
- Empresa de Eletricidade da Madeira, S. A. (2016d). *Sistema Elétrico da Ilha da Madeira*. Retrieved January 10, 2016, from <https://www.eem.pt/pt/conteudo/sistema-el%C3%A9trico/>
- ERSE. (2011). *Recomendação N.º 2/2011 Rotulagem De Energia Elétrica*. Lisboa. Retrieved from http://www.erse.pt/pt/desempenhoambiental/rotulagemenergetica/documentacao/Documents/Recomendacao_2_2011_Rotulagem.pdf
- ERSE. (2014). *Resumo informativo - MERCADO LIBERALIZADO _ Eletricidade*. Lisboa. Retrieved from http://www.erse.pt/pt/electricidade/liberalizaacaodosector/informacaosobreomercadoliberalizado/2014/comunicados/201412_ml_elec_resinf.pdf
- ERSE. (2016). *dados_rotulagem_Rec_2_2011*. Lisboa. Retrieved from http://www.erse.pt/pt/desempenhoambiental/rotulagemenergetica/comparacaoentrecomercializados/Documents/dados_rotulagem_Rec_2_2011.xlsx
- Espinar, B., Aznarte, J. L., Girard, R., Mbairadjim Moussa, A., & Kariniotakis, G. (2010). Photovoltaic Forecasting: A state of the art. In *5th European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference* (p. 250). Retrieved from <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00771465>
- Esteves, J. C. M. (2007). *Optimização de Sistemas Híbridos Fotovoltaicos-Eólicos em Zonas Insulares de Diversidade Climática-Arquipélago da Madeira*. Funchal: Universidade da Madeira. Retrieved from <http://digituma.uma.pt/handle/10400.13/41>
- European Commission, J. R. C. (2006). *Photovoltaic Solar Electricity Potencial in European Countries*. Retrieved February 10, 2016, from <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solrespvgis.htm>
- Fernandes, M. J. P. (2009, February 23). *Riscos no Concelho da Ribeira Brava movimentos de vertente cheias rápidas e inundações*. FEUC. Retrieved from <https://estudogeral.sib.uc.pt/jspui/handle/10316/12826>
- Figueira, C. (2009). *Estudo da precipitação oculta nas florestas naturais do norte do Paul da Serra, Ilha da Madeira*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/258604345_Estudo_da_precipitacao_oculta_nas_florestas_naturais_do_norte_do_Paul_da_Serra_Ilha_da_Madeira
- FLIR Systems Inc. (2010a). *Câmara Termográfica FLIR-P640*. Retrieved from <http://www.flir.com/instruments/display/?id=60087>
- FLIR Systems Inc. (2010b). *Thermal imaging cameras: a fast and reliable tool for testing solar panels*. Retrieved from <http://www.flir.co.uk/instruments/building/display/?id=41872>
- Garg, H. . (1982). *Treatise on Solar Energy, Vol. 1, Fundamentals of Solar Energy Research* (J. Wiley, Vol. I).

- Califórnia.
- Gautier, C., Diak, G., & Masse, S. (1980). A Simple Physical Model to Estimate Incident Solar Radiation at the Surface from GOES Satellite Data. *Journal of Applied Meteorology*, 19, 1005–1012. [http://doi.org/10.1175/1520-0450\(1980\)019<1005:ASPMTE>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0450(1980)019<1005:ASPMTE>2.0.CO;2)
- German Aerospace Center, University of Applied Science Magdeburg Stendal, Icons, CIEMAT, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, European Commission, J. R. C., ... University of Presov. (2010). MESoR. Retrieved February 12, 2016, from <http://www.mesor.org/home.html>
- Glassley, W., Kleissl, J., van Dam, C., Shiu, H., Huang, J., Braun, G., & Holland, R. (2010). California Renewable Energy Forecasting, Resource Data and Mapping. Appendix A: Solar Forecasting, 0–25.
- Green Rhino Energy. (2015). Three Sources of Renewable Energy. Retrieved June 20, 2002, from <http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/>
- Greenhouse Gas Protocol. (2015). *Global Warming Potential Values (AR5). GREENHOUSE GAS PROTOCOL*. Retrieved from [http://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values \(Feb 16 2016\).pdf](http://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20Feb%202016.pdf)
- Hay, J. E., & Hanson, K. J. (1978). A satellite-based methodology for determining solar irradiance at the ocean surface during GATE. *American Meteorological Society Bulletin*, 59, 1549.
- HuksefluxUSA. (2008). ISO-9060 Standard & Pyranometer. Measurement Accuracy. Retrieved from <http://www.hukseflux.com/>
- INEGI & APREN. (2014). *Parques Eólicos em Portugal*. Retrieved from e2p.inegi.up.pt/relatorios/Portugal_Parques_Eolicos_201212.pdf
- INEGI & APREN. (2015). Energias endógenas de portugal (e2p) - Base de dados de fontes renováveis de energia. Retrieved February 28, 2016, from <http://e2p.inegi.up.pt/>
- Ineichen, P. (2014). Long term satellite global, beam and diffuse irradiance validation. *Energy Procedia*, 48, 1586–1596. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.179>
- Inman, R. H., Pedro, H. T. C., & Coimbra, C. F. M. (2013). Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(6), 535–576. <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.06.002>
- Iqbal, M. (2012). *An Introduction To Solar Radiation*. Retrieved from https://books.google.com/books?hl=pt-PT&lr=&id=3_qWce_mbPsC&pgis=1
- ISO (International Organisation of Standardisation). (2007). ISO 21348-2007 Space environment (natural and artificial). Process for determining solar irradiances, 2007, 20. <http://doi.org/10.3403/30109606>
- Justus, C. G., Paris, M. V., & Tarpley, J. D. (1986). Satellite-measured insolation in the United States, Mexico, and South America. *Remote Sensing of Environment*, 20(1), 57–83. [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(86\)90014-3](http://doi.org/10.1016/0034-4257(86)90014-3)
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition. Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition*. Elsevier Inc. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84903805124&partnerID=tZOTx3y1>
- Kipp & Zonen B.V. (2016). Fichas Técnicas dos Piranómetros da Kipp&Zonen. Retrieved February 2, 2016,

- from <http://www.kippzonen.es/ProductGroup/85/Instrumentos-Solares>
- Lefèvre, M., Albuissou, M., & Wald, L. (2004). Description of the software Heliosat-II for the conversion of images acquired by Meteosat satellites in the visible band into maps of solar radiation available at ground level. *Armines and Ecole Des Mines de Paris*. Retrieved from http://www.oie.mines-paristech.fr/Donnees/data09/964-heliosat2_soft_descr2.pdf
- LNEG. (2015). Avaliação do Potencial da Energia Geotérmica Estimulada na Madeira - LNEG. Retrieved February 28, 2016, from <http://www.lneg.pt/iedt/projectos/313/>
- Lopes, S. (2007). *Regime dos ventos estivais no Funchal e sua influência nos padrões térmicos*. Universidade de Lisboa.
- Marullo, S., Dalu, G., & Viola, A. (1987). Incident short-wave radiation at the surface from meteosat data. *II Nuovo Cimento C*, 10(1), 77–90. <http://doi.org/10.1007/BF02508698>
- Mayer, D., Wald, L., Poissant, Y., & Pelland, S. (2008). *Performance prediction of grid-connected photovoltaic systems using remote sensing. Report IEA-PVPS T2-07:2008*. Retrieved from <http://halshs.archives-ouvertes.fr/docs/00/46/68/25/PDF/7BAE9F5Bd01.pdf>
- Middleton Solar Instruments. (2001). Technical Specifications EP08 & EP08-E First Class Pyranometers. Melbourne: METOCEAN ENGINEERS.
- Möser, W., & Raschke, E. (1983). Mapping of global radiation and cloudiness from Meteosat image data- Theory and ground truth comparisons. *Meteor. Rundsch.*, 36.
- Mulugetta, Y., Hertwich, E., Riahi, K., Gibon, T., & Neuhoﬀ, K. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of climate change. IPCC Fifth Assessment Report*. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415416>
- N Energias. (2015). Parque Eólico da Urze. Retrieved from <http://www.nenergias.com/site/nEnergiasSI/index.swf>
- Nascimento Neto, M. D. J. (2013). *Influência da atmosfera terrestre na visibilidade - Estudo da correlação entre dados atmosféricos e visibilidade*. Universidade da Beira Interior.
- Northern Arizona Wind & Sun. (2015). %carga vs tensão. Retrieved from http://www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm
- Output - Energias e Ambiente Lda. (2015). Fotoreportagem da obra efetuada no Parque fotovoltaico do Caniçal. Retrieved February 28, 2016, from <http://www.outputenergia.pt/>
- Perez, R., & Ineichen, P. (1992). Dynamic Global-To-Direct Irradiance Conversion Model (Ashrae). *ASHRAE Trans Res*, 98, 354–69.
- PGRAM. (2015). Fotoreportagem da inauguração oficial do Parque Eólico do Grupo Sousa. Retrieved February 28, 2016, from http://www.pgram.org/modelo_003.asp?id_documento=909
- Pinho, J. T., & Galdinho, M. A. (2014). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. *CEPEL-CRESESB*, 1. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pinker, R. T., & Laszlo, I. (1992). Modeling Surface Solar Irradiance for Satellite Applications on a Global Scale. *Journal of Applied Meteorology*, 31(2), 194–211. [http://doi.org/10.1175/1520-0450\(1992\)031<0194:MSSIFS>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031<0194:MSSIFS>2.0.CO;2)
- Prada, S. (2000). GEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS da ILHA da MADEIRA. *Universidade Da*

- Madeira, 352.
- Prada, S., Gaspar, M. A., Silva, M. O., Cruz, J. V., Portela, M. M., & Hora, G. R. (2003). Recursos Hídricos da Ilha da Madeira - Madeira's Water Resources. <http://doi.org/0873-948X>
- Ribeiro, O. (1985). A ilha da Madeira até meados do século XX. *Instituto de Cultura E Língua Portuguesa (Lisboa)*, 138.
- Sabbagh, J. a. (1977). *Solar Energy Engineering*. *Solar Energy Engineering*. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-620850-4.50011-9>
- Sengupta, M., Habte, A., Kurtz, S., Dobos, A., Wilbert, S., Lorenz, E., ... Perez, R. (2015). Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications, (February), 1–255.
- Sepúlveda, S. (2011). *Avaliação da Precipitação Extrema na Ilha da Madeira Engenharia do Ambiente*. Universidade Técnica de Lisboa. Retrieved from <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395143271110/tese.pdf>
- Tarpley, J. D. (1979). Estimating Incident Solar Radiation at the Surface from Geostationary Satellite Data. *Journal of Applied Meteorology*, 18(9), 1172–1181. [http://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018<1172:EISRAT>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018<1172:EISRAT>2.0.CO;2)
- Vázquez, M. V., Belmonte, P. I., Navarro, J. M. S., Cerqueira, M. T. P., & Esteves, J. C. M. (2008). *Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira* (LREC - Lab). Funchal.
- Vázquez, M. V., Izquierdo, P., Santos, J. M., Prado, M. T., & Esteves, J. C. M. (2007a). *Estudo e apoio científico no domínio da radiação solar*. Funchal.
- Vázquez, M. V., Izquierdo, P., Santos, J. M., Prado, M. T., & Esteves, J. C. M. (2007b). Monthly and yearly maps of daily average global solar radiation of the Madeira archipelago (Portugal), obtained from Meteosat images and six meteorological stations. In *ISES Solar World Congress 2007, ISES 2007* (Vol. 4, pp. 2641–2645). Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84875890398&partnerID=tZOtx3y1>
- Vázquez, M. V., Santos Navarro, J. M., Prado Cerqueira, M. T., Vázquez Ríos, D., & Rodrigues Fernandes, F. M. (2005). *Atlas de Radiación Solar de Galicia*. Vigo.
- Vilela, W. A. (2010). *Estudo, Desenvolvimento e Caracterização de Radiômetros para Medidas de Radiação Solar*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Retrieved from <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/389G8B5>
- VSR Construções Metálicas. (2016). Parque Fotovoltaico do Loiral. Retrieved February 1, 2016, from <http://www.vsr.pt/index.php/obras.html>
- Wilcox, S., & Marion, W. (2008). Users Manual for TMY3 Data Sets, Technical Report NREL/TP-581-43156, (May), 58.
- WMO. (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (7 th). Geneve, Suíça. Retrieved from http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_8_en-2012.pdf

7 ANEXOS

- A.1 ANÁLISE DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS LREC
- A.2 ANÁLISE DOS REGISTOS DA REDE DE EMAS IPMA
- A.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS REGISTOS DAS DUAS REDES DE EMAS
- A.4 ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS REGISTOS DAS EMAS E OS DA BASE DE DADOS
PVGIS
- A.5 ESTUDO COMPARATIVO RELATIVAMENTE AO *ATLAS DA RADIAÇÃO SOLAR*

Continuação...Anexo A.1.1 - Procedimento de tratamento dos registos das EMAs LREC

EMA do Trapiche 2012		EMA dos Prazeres		EMA do P.E. Funchal			
17-10-2012	00:59:50	0,0	09-01-2014	00:59:59	03-12-2011	00:00:18	-0,3
17-10-2012	00:59:50	0,0	09-01-2014	01:59:50	03-12-2011	01:00:47	-0,4
17-10-2012	01:59:50	0,0	09-01-2014	03:00:00	03-12-2011	01:59:58	-0,3
17-10-2012	01:59:50	0,0	09-01-2014	04:00:00	03-12-2011	03:00:13	-0,4
17-10-2012	02:59:50	0,0	09-01-2014	04:59:50	03-12-2011	03:59:59	-0,4
17-10-2012	02:59:50	0,0	09-01-2014	05:59:59	03-12-2011	05:00:28	-0,4
17-10-2012	03:59:50	0,0	09-01-2014	06:59:59	03-12-2011	06:00:14	-0,2
17-10-2012	03:59:50	0,0	09-01-2014	07:59:50	03-12-2011	07:00:07	-0,1
17-10-2012	04:59:50	0,0	09-01-2014	09:00:00	03-12-2011	08:00:03	3,0
17-10-2012	04:59:50	0,0	09-01-2014	10:00:00	03-12-2011	08:59:51	216,4
17-10-2012	05:59:50	0,1	09-01-2014	10:59:50	03-12-2011	09:59:50	591,0
17-10-2012	05:59:50	0,1	09-01-2014	11:59:50	03-12-2011	10:59:49	1067,9
17-10-2012	06:59:50	0,1	09-01-2014	12:59:50	03-12-2011	11:59:48	1269,7
17-10-2012	06:59:50	0,1	09-01-2014	14:00:00	03-12-2011	12:59:47	1645,8
17-10-2012	07:59:50	41,2	09-01-2014	15:00:00	03-12-2011	13:59:46	1478,8
17-10-2012	07:59:50	41,2	09-01-2014	16:00:00	03-12-2011	14:59:45	1194,6
17-10-2012	08:59:50	698,9	09-01-2014	16:59:50	03-12-2011	15:59:44	765,6
17-10-2012	08:59:50	698,9	09-01-2014	18:00:00	03-12-2011	16:59:43	485,8
17-10-2012	09:59:50	1084,4	09-01-2014	19:00:00	03-12-2011	17:59:54	129,0
17-10-2012	09:59:50	1084,4	09-01-2014	20:00:00	03-12-2011	19:00:40	0,5
17-10-2012	10:59:50	1217,8	09-01-2014	20:59:59	03-12-2011	20:00:35	-0,3
17-10-2012	10:59:50	1217,8	09-01-2014	21:59:59	03-12-2011	21:00:35	-0,3
17-10-2012	11:59:50	1036,3	09-01-2014	22:59:59	03-12-2011	22:00:40	-0,3
17-10-2012	11:59:50	1036,3	09-01-2014	23:59:50	03-12-2011	23:00:13	-0,2

Anexo A.1.2 - Resumo da etapas do procedimento de tratamento dos registos das EMAS LREC

Original			Procedimento			Após o Procedimento		
Data	Hora	Valor	Data	Hora	Valor	Data	Hora	Valor
04-07-2006	11:59:48	2737,8	04-07-2006			04-07-2006	00:00:00	
04-07-2006	12:59:47	3135,4	04-07-2006			04-07-2006	01:00:00	
04-07-2006	13:59:46	3410,1	04-07-2006			04-07-2006	02:00:00	
04-07-2006	14:59:45	3589,3	04-07-2006			04-07-2006	03:00:00	
04-07-2006	15:59:44	2923,6	04-07-2006			04-07-2006	04:00:00	
04-07-2006	16:59:43	1136,5	04-07-2006			04-07-2006	05:00:00	
04-07-2006	17:59:42	1310,4	04-07-2006			04-07-2006	06:00:00	
04-07-2006	18:59:41	751,17	04-07-2006			04-07-2006	07:00:00	
04-07-2006	20:00:34	197,14	04-07-2006			04-07-2006	08:00:00	
			04-07-2006			04-07-2006	09:00:00	
			04-07-2006			04-07-2006	10:00:00	
			04-07-2006	11:59:48	2737,8	04-07-2006	11:00:00	2737,8
			04-07-2006	12:59:47	3135,4	04-07-2006	12:00:00	3135,4
			04-07-2006	13:59:46	3410,1	04-07-2006	13:00:00	3410,1
			04-07-2006	14:59:45	3589,3	04-07-2006	14:00:00	3589,3
			04-07-2006	15:59:44	2923,6	04-07-2006	15:00:00	2923,6
			04-07-2006	16:59:43	1136,5	04-07-2006	16:00:00	1136,5
			04-07-2006	17:59:42	1310,4	04-07-2006	17:00:00	1310,4
			04-07-2006	18:59:41	751,17	04-07-2006	18:00:00	751,17
			04-07-2006	20:00:34	197,14	04-07-2006	19:00:00	197,14
			04-07-2006			04-07-2006	20:00:00	
			04-07-2006			04-07-2006	21:00:00	
			04-07-2006			04-07-2006	22:00:00	
			04-07-2006			04-07-2006	23:00:00	

Anexo A.1.3 - Lacunas de dias nos registos da rede de EMAs LREC entre o 1º mês completo de dados até agosto de 2015

Início	01-jun-05	23-jun-05	01-jul-05	09-jul-05	13-set-05	25-out-05	01-set-06	23-ago-08	07-abr-10	20-mai-11	13-ago-11
<u>Dados</u>	01-jun-05	01-jul-05	01-jul-05	01-out-05	01-out-05	01-jul-07	01-set-06	01-jan-09	01-abr-10	01-jun-11	01-set-11
2005/15	LREC	Encumeada (LREC)	Pico Verde (LREC)	Porto Moniz (LREC)	Bica da Cana (LREC)	Desertas	P.E.Funchal (LREC)	Machico (LREC)	Pico das Pedras (LREC)	Prazeres (LREC)	Trapiche (LREC)
2005	0	4	0	8	4	0	0	0	0	0	0
2006	119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2007	0	0	0	8	0	0	22	0	0	0	0
2008	0	55	0	64	0	0	0	0	0	0	0
2009	0	0	5	6	0	0	1	0	0	0	0
2010	0	0	24	0	11	0	80	23	11	0	0
2011	0	0	2	1	0	19	7	0	15	0	13
2012	6	0	35	19	0	366	64	0	0	0	14
2013	0	0	17	221	26	365	205	0	0	182	52
2014	2	142	295	364	284	365	297	254	258	301	250
2015	0	0	0	120	3	243	10	4	33	180	189
Total	127	201	378	811	328	19	686	281	317	663	518
Dias func.	3744	3714	3714	3622	3622	1413	3287	2434	1979	1553	1461
% lacunas	3,4%	5,4%	10,2%	22,4%	9,1%	1,3%	20,9%	11,5%	16,0%	42,7%	35,5%

Anexo A.1.4 - Meses utilizados no cálculo da Irradiação Solar Global Diária da rede de EMAs LREC

Início	01-jun-05	23-jun-05	01-jul-05	09-jul-05	13-set-05	25-out-05	01-set-06	23-ago-08	07-abr-10	20-mai-11	13-ago-11
Dados	01-jun-05	01-jul-05	01-jul-05	01-out-05	01-out-05	01-jul-07	01-set-06	01-jan-09	01-abr-10	01-jun-11	01-set-11
2005/15	LREC	Encumeada (LREC)	Pico Verde (LREC)	Porto Moniz (LREC)	Bica da Cana (LREC)	Desertas	P.E.Funchal (LREC)	Machico (LREC)	Pico das Pedras (LREC)	Prazeres (LREC)	Trapiche (LREC)
jan	10	10	10	7	10	4	8	6	4	3	4
fev	10	10	10	8	9	4	8	5	5	3	3
mar	10	10	10	8	10	4	7	5	5	2	2
abr	10	10	9	8	10	4	7	4	5	2	2
mai	10	10	9	8	9	2	7	6	5	2	2
jun	11	10	9	8	9	2	7	6	5	2	1
jul	10	11	10	8	9	4	8	6	5	3	1
ago	10	9	10	8	9	4	7	6	5	3	2
set	9	9	9	7	8	4	6	5	4	2	3
out	9	8	9	8	9	4	6	5	4	2	3
nov	10	9	8	7	9	4	8	5	4	2	3
dez	10	8	7	7	9	4	9	5	4	3	4

Anexo A.1.5 - Variação anual da ISGD, da rede de EMAs LREC, entre o 1º mês completo de dados e, agosto de 2015 (Wh/m².dia)

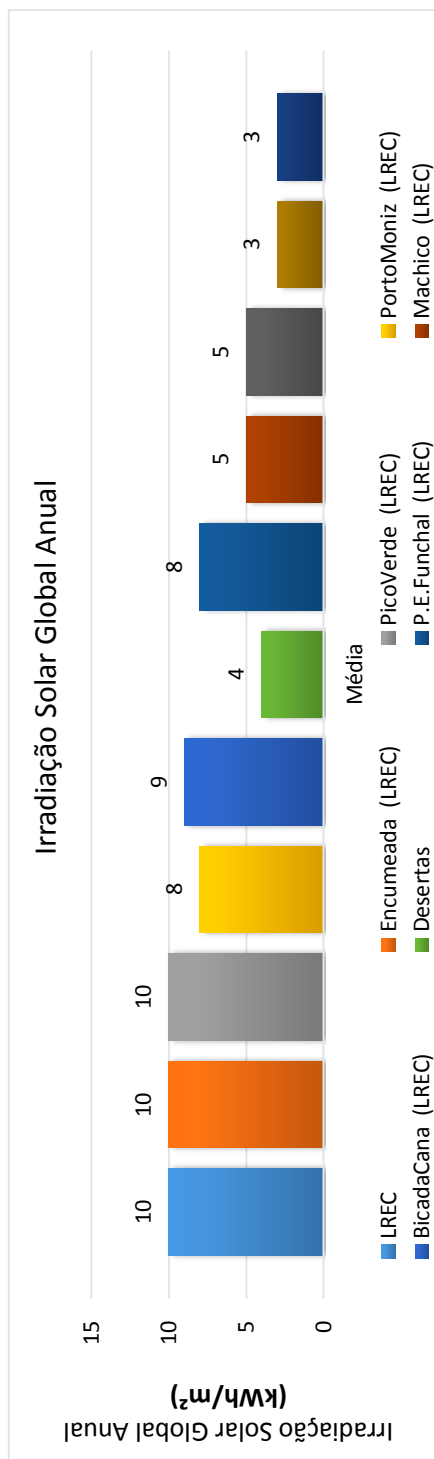
Início	01-jun-05	23-jun-05	01-jul-05	01-jul-05	09-jul-05	13-set-05	25-out-05	01-set-06	23-ago-08	07-abr-10	20-mai-11	13-ago-11
<u>Dados</u>	01-jun-05	01-jul-05	01-jul-05	01-jul-05	01-out-05	01-out-05	01-jul-07	01-set-06	01-jan-09	01-abr-10	01-jun-11	01-set-11
2005/15	LREC	Encumeada (LREC)	Pico Verde (LREC)	Porto Moniz (LREC)	Bica da Cana (LREC)	Desertas	P.E.Funchal (LREC)	Machico (LREC)	Pico das Pedras (LREC)	Prazeres (LREC)	Trapiche (LREC)	
jan	2977	2373	2915	1984	2905	2420	2152	2374	1990	2434	2544	
fev	3710	2677	3540	2631	3501	3069	2537	2683	3120	3032	3160	
mar	4795	3647	4763	3463	4942	3874	3700	4043	3897	3824	4209	
abr	5431	4397	5536	4346	5694	4613	4420	5356	4036	5448	3901	
mai	5839	4961	6700	4810	6578	5348	5132	5212	4471	5338	4262	
jun	5775	5483	7531	5233	7739	5508	5938	6249	5749	6651	4904	
jul	6068	5844	8294	5494	8436	4896	6836	6604	6117	6798	5576	
ago	5858	5267	6968	4797	7290	4654	5908	6104	5255	5354	4551	
set	4885	3964	5001	3851	5151	3998	3806	4627	3607	4566	3452	
out	4116	2966	3692	3040	3847	3302	3357	3630	2809	3400	3080	
nov	3091	2240	2932	1978	2582	2508	2155	2381	1788	2343	2126	
dez	2634	2128	2548	1693	2526	2125	1817	2221	1821	2237	2190	
Média Anual	4598	3829	5035	3610	5099	3860	3980	4290	3722	4285	3663	

Anexo A.1.6 - Variação anual da ISGD, da rede de EMAS LREC, entre o 1º mês completo de dados e, agosto de 2015 (kJ/m².dia)

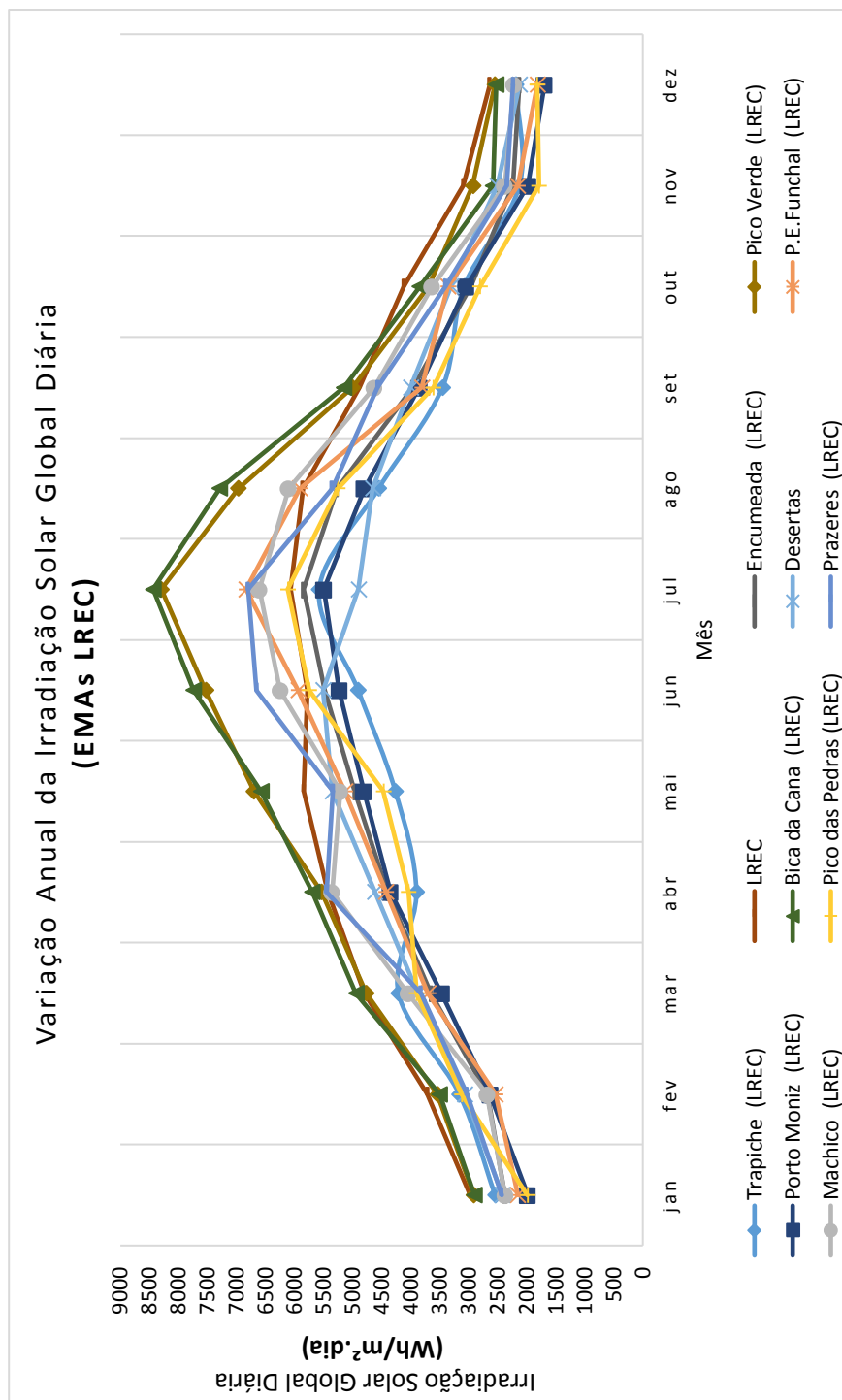
Início	01-jun-05	23-jun-05	01-jul-05	01-jul-05	09-jul-05	13-set-05	25-out-05	01-set-06	23-ago-08	07-abr-10	20-mai-11	13-ago-11
<u>Dados</u>	01-jun-05	01-jul-05	01-jul-05	01-jul-05	01-out-05	01-out-05	01-jul-07	01-set-06	01-jan-09	01-abr-10	01-jun-11	01-set-11
2005/15	LREC	Encumeada (LREC)	Pico Verde (LREC)	Porto Moniz (LREC)	Bica da Cana (LREC)	Desertas	P.E.Funchal (LREC)	Machico (LREC)	Pico das Pedras (LREC)	Prazeres (LREC)	Trapiche (LREC)	
jan	10717	8542	10494	7338	10457	8711	7601	8660	8175	8761	9160	
fev	13356	9639	12746	9472	12613	11049	9134	9660	11233	9616	10029	
mar	17261	13129	17147	12469	17790	13946	13127	14553	14029	13143	15152	
abr	19550	15831	19929	15646	20497	16606	14973	19902	14529	19613	14045	
mai	21021	17860	24120	17310	23682	16205	17549	18763	16095	19215	15345	
jun	20788	19739	27111	18391	27860	14379	21440	22495	20697	22724	14960	
jul	21576	21037	29860	19779	30368	17627	24610	23774	22020	24474	20072	
ago	21087	19335	25084	17271	26245	16754	21269	21974	18916	19275	14978	
set	17585	13911	18003	13864	18544	14392	13702	16659	12985	16437	11959	
out	14420	10677	13292	10944	13849	11886	11755	13069	10113	12241	11089	
nov	11126	7715	10149	7121	9293	9028	7268	8573	6438	8435	7796	
dez	9483	7661	8525	6411	9093	7649	6543	7995	6556	8052	7883	
Média Anual	16498	13756	18038	13001	18358	13186	14081	15507	13482	15165	12706	

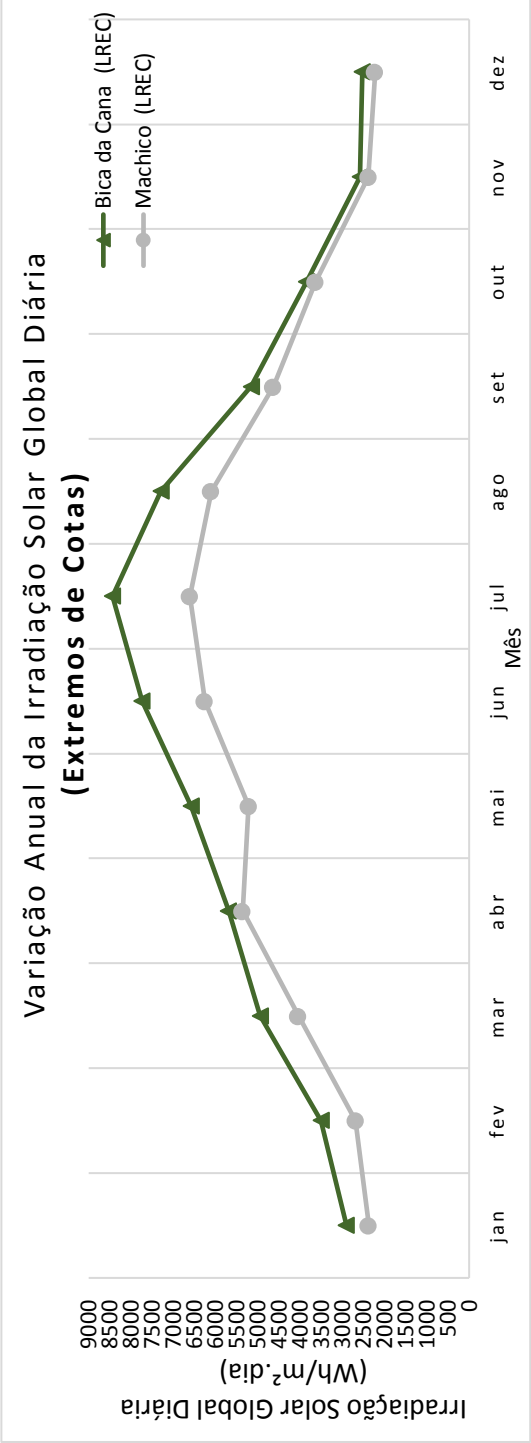
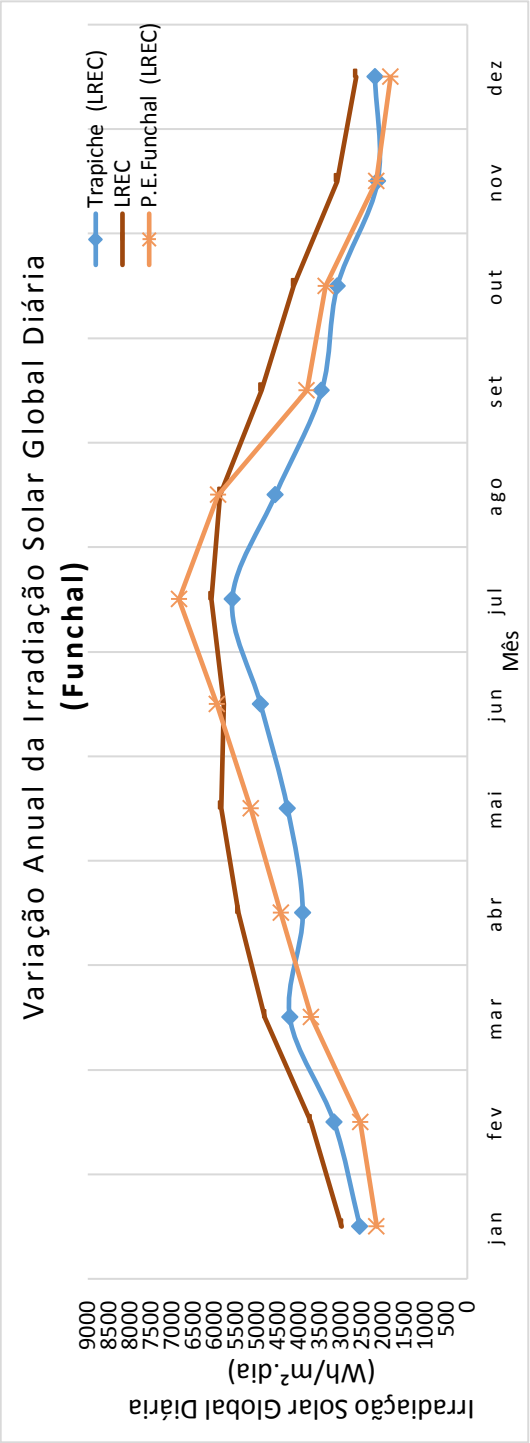
Anexo A.1.7 - Irradiação Solar Global Anual (Energia disponível) (KWh/m²)

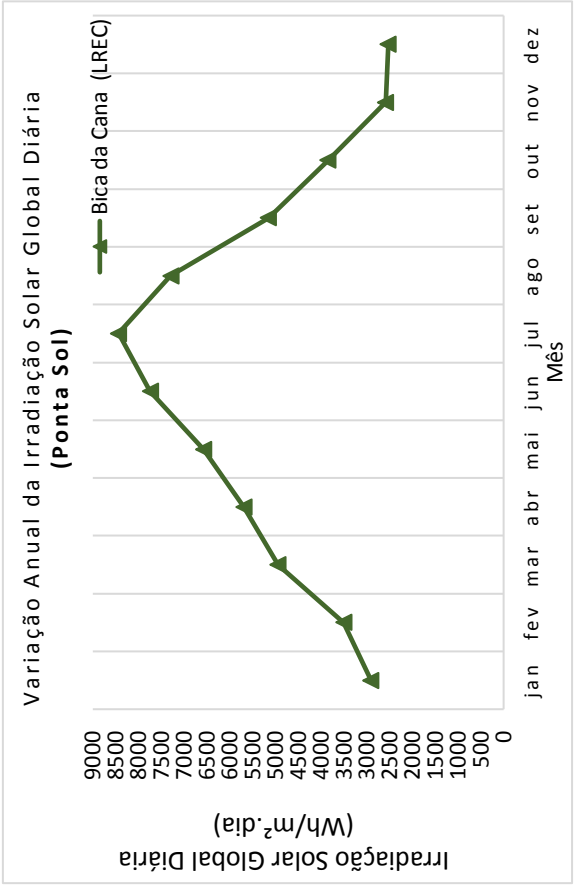
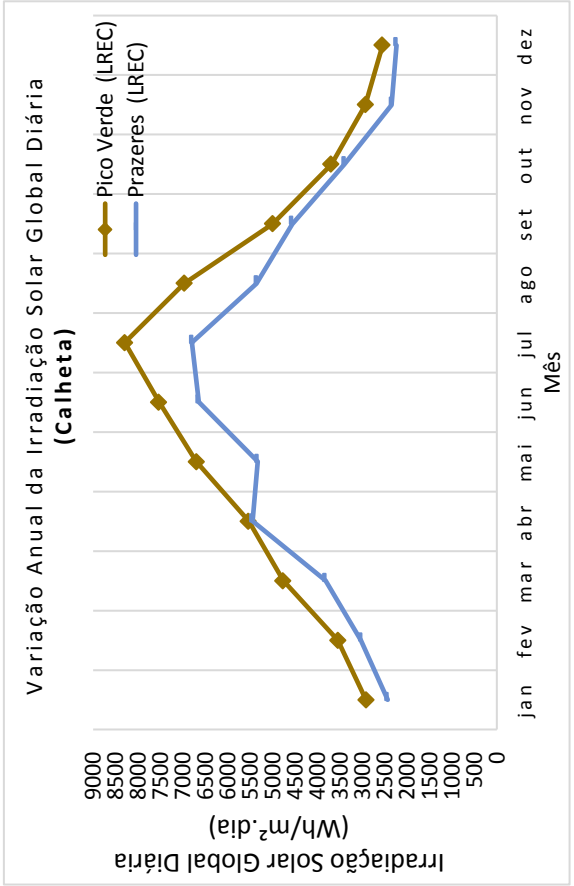
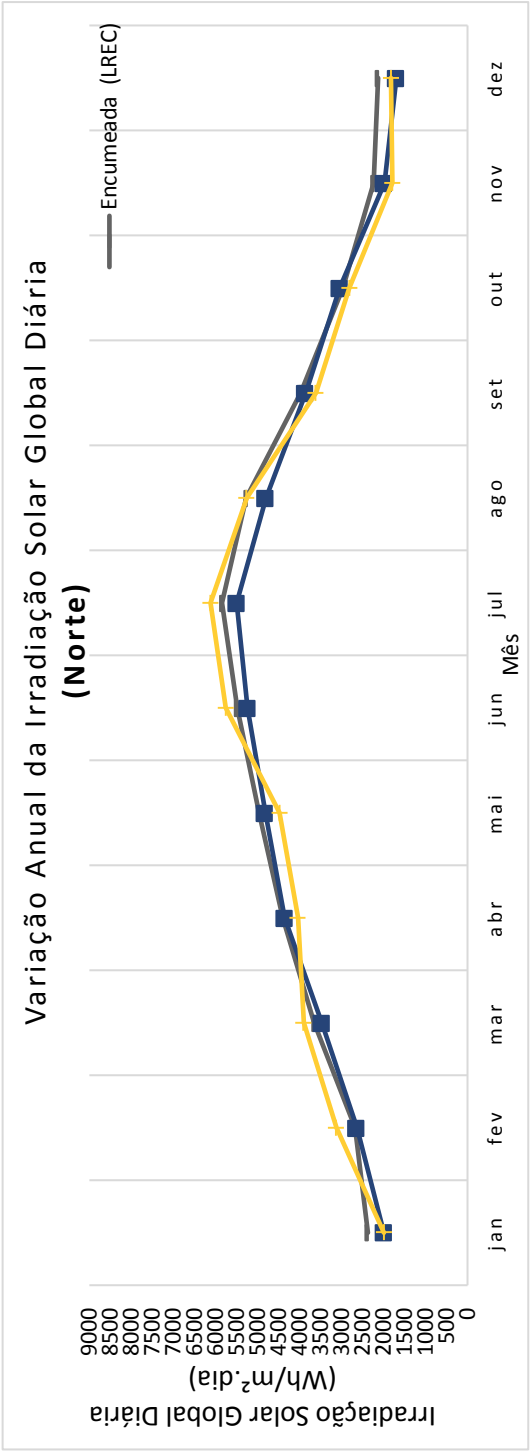
	LREC	Encumeada (LREC)	Pico Verde (LREC)	Porto Moniz (LREC)	Bica da Cana (LREC)	Desertas	P.E.Funchal (LREC)	Machico (LREC)	Pico das Pedras (LREC)	Prazeres (LREC)	Trapiche (LREC)
2005	937	676	844	179	337	0	0	0	0	0	0
2006	934	1355	1752	1335	1837	0	386	0	0	0	0
2007	1677	1335	1803	1277	1774	648	1524	0	0	0	0
2008	1726	1143	1894	1098	1840	1469	1690	0	0	0	0
2009	1650	1314	1780	1245	1847	1395	1625	1483	0	0	0
2010	1607	1355	1745	1331	1775	1136	1304	1416	1060	0	0
2011	1734	1394	1872	1223	1961	494	1449	1590	1296	1094	348
2012	1664	1509	1755	1433	1892	0	931	1633	1326	1590	1333
2013	1705	1464	1814	497	1770	0	416	1605	1458	683	1020
2014	1733	982	254	2	351	0	107	178	309	148	287
2015	1346	1196	1581	725	1587	0	824	919	1056	366	171
Média	1687	1389	1802	1307	1837	1333	1572	1545	1360	1590	1333

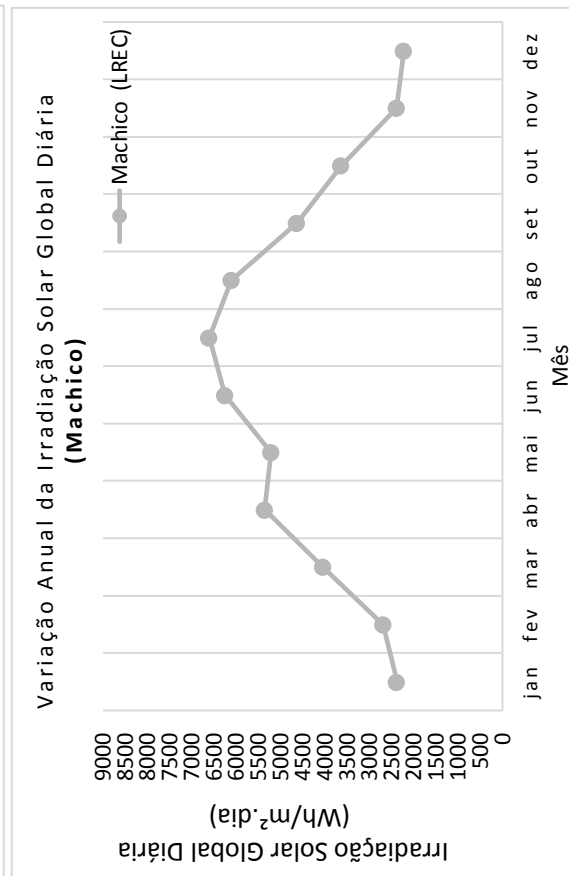
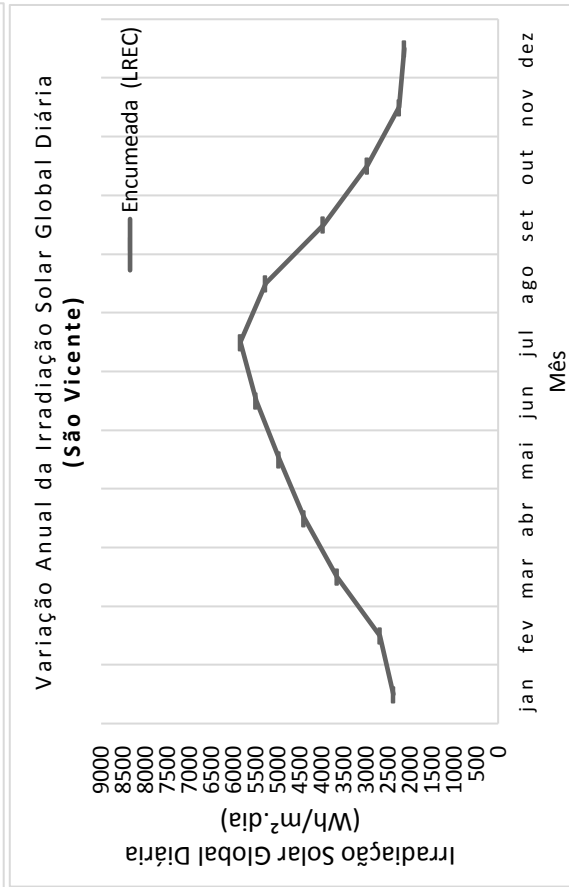
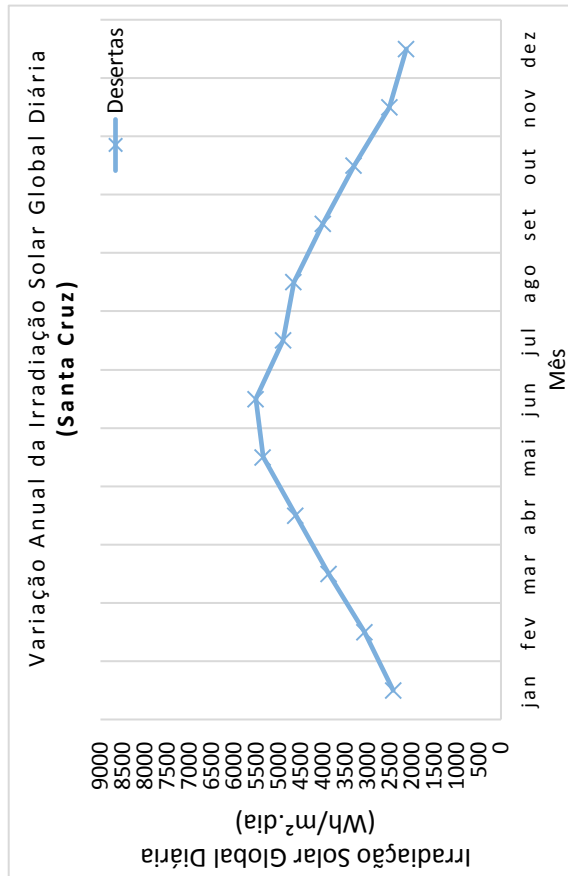
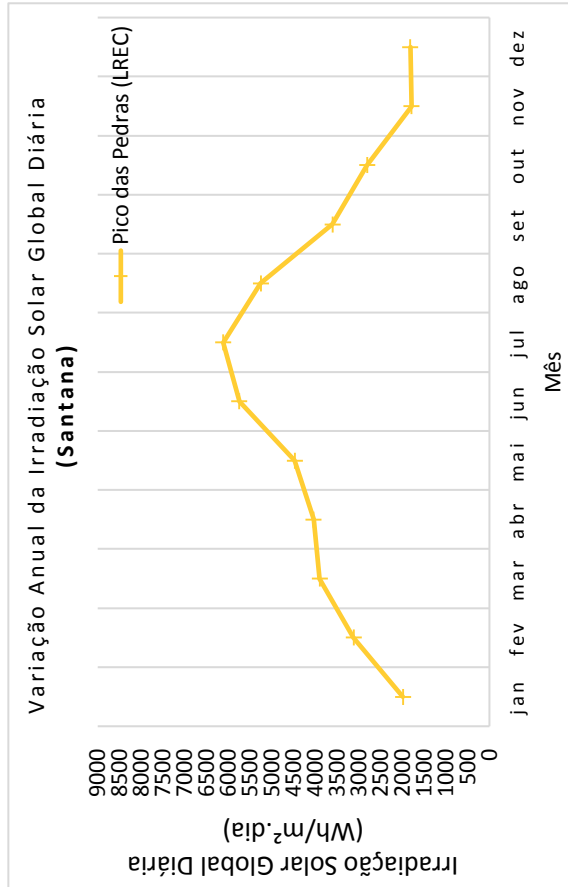


Anexo A.1.8 - Gráficos da variação anual da Irradiação Solar Global Diária nas EMAs da rede LREC (Wh/m².dia)









Anexo A.2 - ANÁLISE DOS REGISTOS DAS EMAS DA REDE IPMA

Anexo A.2.1 - Lacunas de dias nos registos das EMAs da rede IPMA entre o 1º mês completo de dados até agosto de 2015

Início	26-abr-95	01-dez-14	26-abr-95	06-mar-14	11-fev-02	23-ago-10	23-ago-10	23-ago-10	11-fev-02
Dados	01-set-02	01-dez-14	01-out-03	01-abr-14	01-set-02	01-set-10	01-set-10	01-set-10	01-out-02
2002/15	Observatório (IPMA)	Aero. Sta. C. (IPMA)	Aero. P.S. (IPMA)	Porto Moniz (IPMA)	São Jorge (IPMA)	Santana (IPMA)	São Vicente (IPMA)	Bica Cana (IPMA)	Funchal Lido (IPMA)
2002	0				2				2
2003	10		2		32				0
2004	246		247		247				0
2005	65		67		72				0
2006	68		0		1				111
2007	63		0		2				114
2008	3		3		3				49
2009	0		0		0				13
2010	0		22		0	0	0	0	0
2011	0		14		0	0	0	0	12
2012	3		3		0	0	0	0	0
2013	0		0		1	0	0	0	0
2014	0	0	0	3	0	0	0	0	0
2015	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	458	0	358	3	360	0	0	0	301
Dias func.	4748	274	4353	543	4748	1826	1826	1826	4718
% lacunas	9,6%	0,0%	8,2%	0,6%	7,6%	0,0%	0,0%	0,0%	6,4%

continuação... Anexo A.2.1 - Lacunas de dias nos registros das EMAs da rede IPMA

Anexo A.2.2 - Meses utilizados no cálculo da Irradiação Solar Global Diária das EMAs da rede IPMA

2002/15	Observatório (IPMA)	Aero. Sta. C. (IPMA)	Aero. P.S. (IPMA)	Porto Moniz (IPMA)	São Jorge (IPMA)	Santana (IPMA)	São Vicente (IPMA)	Bica Cana (IPMA)	Funchal Lido (IPMA)
jan	14	1	13	1	14	5	5	6	12
fev	14	1	13	1	14	5	5	6	12
mar	14	1	13	1	14	5	5	6	12
abr	14	1	13	2	14	5	5	6	12
mai	14	1	13	2	14	5	5	6	12
jun	14	1	13	2	14	5	5	6	12
jul	14	1	13	2	14	5	5	6	12
ago	14	1	13	2	14	5	5	6	12
set	14	0	12	1	13	5	5	5	11
out	13	0	12	1	13	5	5	5	12
nov	13	0	12	1	13	5	5	5	12
dez	13	1	12	1	13	5	5	5	12

2002/15	Pico Alto (IPMA)	Chão Areeiro (IPMA)	Santo da Serra (IPMA)	P.S. Lourenço (IPMA)	L. da Terça (IPMA)	Quinta Grande (IPMA)	Lugar de Baixo (IPMA)	P. do Pargo (IPMA)
jan	1	12	5	5	6	5	13	9
fev	1	12	5	6	6	5	13	9
mar	1	12	5	6	6	5	13	9
abr	1	12	5	6	6	5	13	9
mai	1	12	5	6	6	5	13	9
jun	1	12	5	6	6	5	13	9
jul	1	12	5	6	6	5	13	9
ago	1	12	5	6	7	5	13	9
set	0	12	5	5	6	5	13	8
out	0	12	5	5	6	5	13	8
nov	0	12	5	5	6	5	13	8
dez	0	12	5	5	6	5	13	8

Anexo A.2.3 - Variação anual da ISGD, nas EMAs da rede IPMA, entre o 1º mês completo de dados e, agosto de 2015 (Wh/m².dia)

Início	26-abr-95	01-dez-14	26-abr-95	06-mar-14	11-fev-02	23-ago-10	23-ago-10	11-fev-02
Dados	01-set-02	01-dez-14	01-out-03	01-abr-14	01-set-02	01-set-02	01-set-02	01-out-02
2002/15	Observatório (IPMA)	Aero. Sta. C. (IPMA)	Aero. P.S. (IPMA)	Porto Moniz (IPMA)	São Jorge (IPMA)	Santana (IPMA)	São Vicente (IPMA)	Funchal Lido (IPMA)
jan	2855	3177	2760	1832	2251	1934	2016	2834
fev	3486	3207	3583	2262	2880	2385	2646	3518
mar	4671	4801	4981	3094	4070	3575	3592	4520
abr	5254	5757	5865	4720	5125	4245	4219	5135
mai	5695	6972	6168	4756	5531	4311	4648	5781
jun	5707	6355	7030	5808	5711	4902	5501	5972
jul	5971	7634	7062	5748	5702	4635	5409	6193
ago	5608	5457	6228	5316	5204	4423	4794	5621
set	4857		5439	4808	4623	3885	3840	4929
out	3980		4256	3127	3529	2985	2977	3952
nov	2938		2900	1713	2258	1890	1863	2963
dez	2525	2244	2469	1392	2068	1792	1847	2538
Média	4462	5067	4895	3715	4079	3413	3613	4496

continuação... Anexo A.2.3 - Variação anual da ISGD, nas EMAs da rede IPMA (Wh/m².dia)

Início	01-ago-14	11-fev-02	23-ago-10	11-jul-09	11-jul-09	11-jul-09	23-ago-10	11-fev-02	11-fev-02
Dados	01-jan-15	01-set-02	01-set-10	01-fev-10	01-ago-09	01-set-10	Quinta Grande (IPMA)	01-set-02	01-jan-07
2002/15	Pico Alto (IPMA)	Chão Areeiro (IPMA)	Santo da Serra (IPMA)	P.S. Lourenço (IPMA)	L. da Terça (IPMA)	Quinta Grande (IPMA)	Lugar de Baixo (IPMA)	P. do Pargo (IPMA)	
jan	2976	3003	1718	2606	2261	2239	2992	2910	
fev	3640	3613	2269	3119	2600	2950	3619	3667	
mar	5032	4959	3387	4549	3968	3971	4823	4851	
abr	4186	5546	3766	5577	4953	4378	5671	5980	
mai	7130	6766	4034	5914	5416	4855	6126	6523	
jun	6227	7422	4201	6223	6356	5125	6313	7283	
jul	7328	7937	4447	6141	6095	5013	6405	7379	
ago	3891	6790	4055	5817	5966	4545	5990	6571	
set	2818	4811	3796	5044	4195	3661	5195	5197	
out		3779	2613	3936	3226	3006	4165	4118	
nov		2644	1706	2675	1847	2243	3111	2927	
dez		2445	1461	2315	1796	1863	2618	2626	
Média	4803	4976	3121	4493	4057	3654	4752	5003	

Anexo A.2.4 - Variação anual da ISGD, nas EMAs da rede IPMA, entre o 1º mês completo de dados e, agosto de 2015 (kl/m².dia)

Início	26-abr-95	01-dez-14	26-abr-95	06-mar-14	11-fev-02	23-ago-10	23-ago-10	11-fev-02
Dados	01-set-02	01-dez-14	01-out-03	01-abr-14	01-set-02	01-set-02	01-set-02	01-out-02
2002/15	Observatório (IPMA)	Aero. Sta. C. (IPMA)	Aero. P.S. (IPMA)	Porto Moniz (IPMA)	São Jorge (IPMA)	Santana (IPMA)	Bica Cana (IPMA)	Funchal Lido (IPMA)
jan	10277	11436	9937	6594	8103	6961	7773	10201
fev	12551	11545	12899	8145	10366	8586	9844	12665
mar	16816	17283	17930	11138	14653	12870	13262	16274
abr	18914	20726	21114	16991	18449	15283	14513	18485
mai	20503	25099	22204	17123	19911	15519	17346	20811
jun	20546	22877	25309	20910	20559	17646	21902	21499
jul	21496	27481	25423	20692	20526	16685	21621	22297
ago	20188	19646	22419	19138	18733	15921	17474	20236
set	17486		19581	17309	16643	13986	14971	17746
out	14329		15323	11258	12703	10747	11455	14227
nov	10575		10440	6168	8129	6804	7748	10665
dez	9089	8079	8888	5013	7443	6453	8299	9136
Média	16064	18241	17622	13373	14685	12288	13006	16187

Início	01-ago-14	11-fev-02	23-ago-10	11-jul-09	23-ago-10	11-jul-09	11-fev-02	11-fev-02
Dados	01-jan-15	01-set-02	01-set-10	01-fev-10	01-ago-09	01-set-10	01-set-02	01-jan-07
2002/15	Pico Alto (IPMA)	Chão Areeiro (IPMA)	Santo da Serra (IPMA)	P.S. Lourenço (IPMA)	L. da Terça (IPMA)	Quinta Grande (IPMA)	Lugar de Baixo (IPMA)	P. do Pargo (IPMA)
jan	10715	10810	6185	9380	8140	8061	10769	10475
fev	13105	13007	8169	11228	9359	10620	13027	13202
mar	18116	17854	12194	16376	14285	14296	17362	17464
abr	15068	19965	13556	20077	17830	15762	20414	21526
mai	25670	24357	14522	21291	19497	17478	22055	23484
jun	22419	26718	15123	22403	22881	18449	22728	26218
jul	26379	28574	16009	22108	21943	18047	23059	26564
ago	14007	24446	14597	20943	21476	16360	21563	23656
set	10144	17321	13667	18160	15102	13179	18704	18711
out		13606	9407	14170	11615	10820	14994	14823
nov		9519	6141	9630	6650	8074	11198	10536
dez		8802	5258	8335	6464	6706	9426	9454
Média	17291	17915	11236	16175	14603	13154	17108	18009

Anexo A.2.5 - Irradiação Solar Global Anual nas EMAs da rede IPMA (Energia disponível anual) (KWh/m²)

Dados	01-set-02	01-dez-14	01-out-03	01-abr-14	01-set-02	01-set-02	01-set-02	01-set-02	01-set-02	01-out-02
2002/15	Observatório (IPMA)	Aero. Sta. C. (IPMA)	Aero. P.S. (IPMA)	Porto Moniz (IPMA)	São Jorge (IPMA)	Santana (IPMA)	São Vicente (IPMA)	Bica Cana (IPMA)	Funchal Lido (IPMA)	
2002	434	0	0	0	414	0	0	0	335	
2003	1548	0	282	0	1409	0	0	0	1621	
2004	415	0	423	0	347	0	0	0	1619	
2005	1189	0	1382	0	1089	0	0	0	1593	
2006	1413	0	1878	0	1565	0	0	0	1241	
2007	1415	0	1871	0	1522	0	0	0	1148	
2008	1650	0	1944	0	1573	0	0	0	1553	
2009	1593	0	1813	0	1483	0	0	0	1502	
2010	1550	0	1654	0	1426	384	383	381	1545	
2011	1684	0	1672	0	1380	1269	1361	1635	1619	
2012	1692	0	1844	0	1540	1331	1363	1581	1694	
2013	1634	0	1757	0	1398	1203	1294	1619	1667	
2014	1704	70	1810	1228	1478	1241	1288	1649	1741	
2015	1291	1382	1414	1078	1151	935	1041	1352	1345	

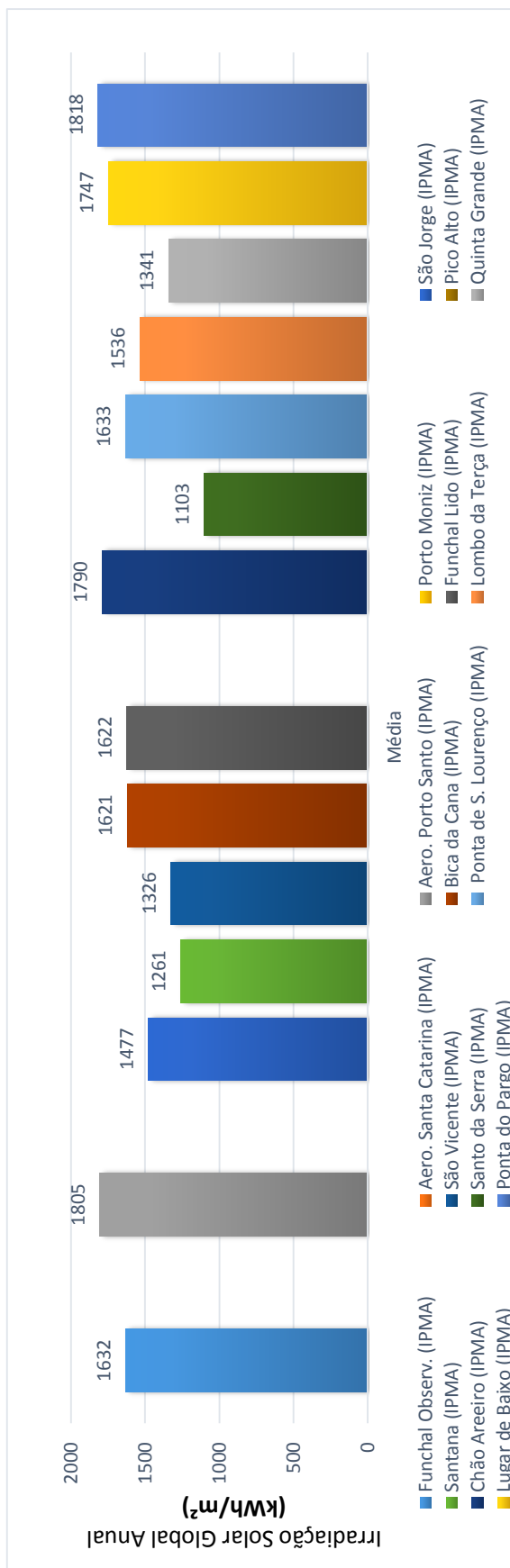
continuação... Anexo A.2.5 - Irradiação Solar Global Anual nas EMAs da rede IPMA (KWh/m²)

Dados	01-jan-15	01-set-02	01-set-10	01-fev-10	01-ago-09	01-set-10	01-set-02	01-jan-07
2002/15	Pico Alto (IPMA)	Chão Areeiro (IPMA)	Santo da Serra (IPMA)	P.S. Lourenço (IPMA)	L. da Terça (IPMA)	Quinta Grande (IPMA)	Lugar de Baixo (IPMA)	P. do Pargo (IPMA)
2002	0	377	0	0	0	0	431	0
2003	0	1682	0	0	0	0	1562	0
2004	0	404	0	0	0	0	415	0
2005	0	1339	0	0	0	0	1306	0
2006	0	1706	0	0	0	0	1797	0
2007	0	1772	0	0	0	0	1845	1308
2008	0	1872	0	0	0	0	1933	2013
2009	0	1832	0	0	601	0	1814	1873
2010	0	1670	320	1513	997	358	1622	1712
2011	0	1827	1137	1643	1004	1364	1711	1817
2012	0	1759	1071	1738	1566	1354	1749	1807
2013	0	1799	1116	1596	1493	1302	1675	1723
2014	0	1897	1087	1628	1549	1343	1759	1782
2015	1274	1505	842	1265	1324	1045	1286	0

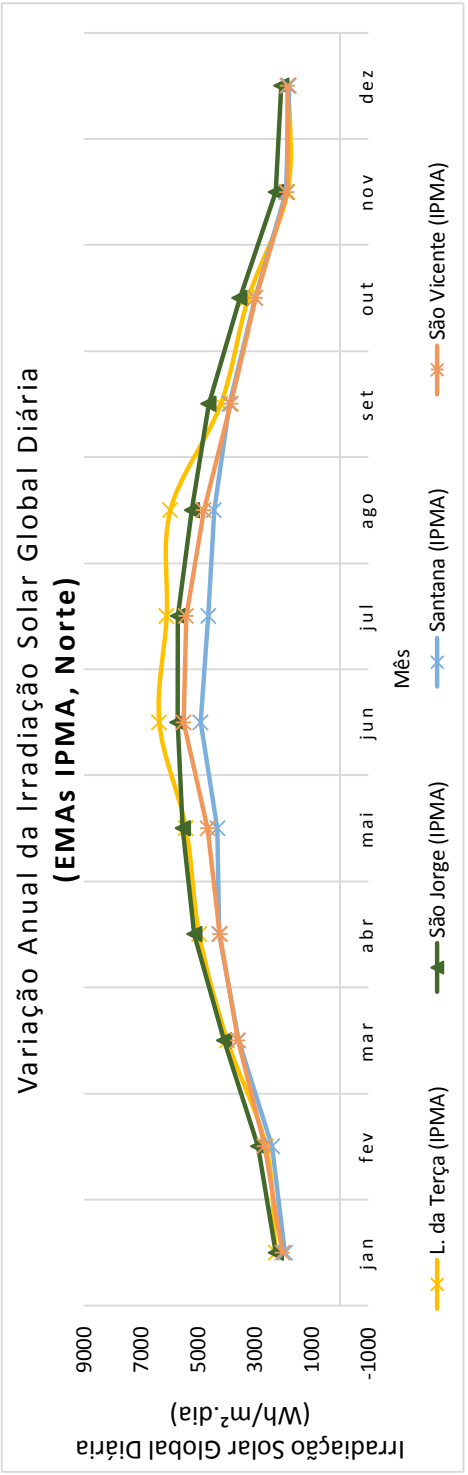
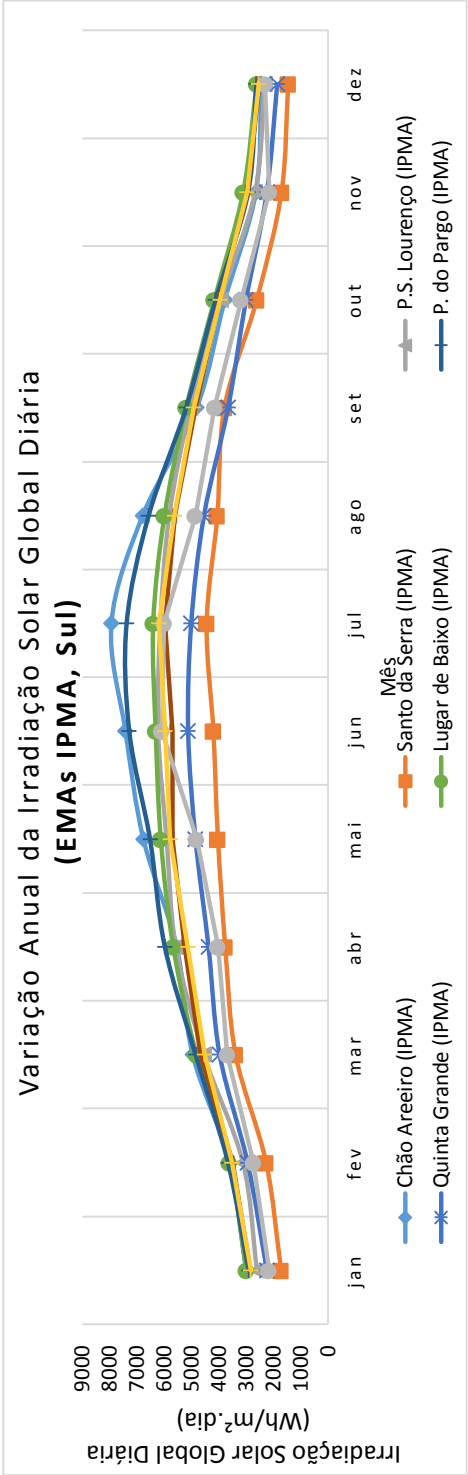
continuação... Anexo A.2.5 - Irradiação Solar Global Anual nas EMAs da rede IPMA (KWh/m²)

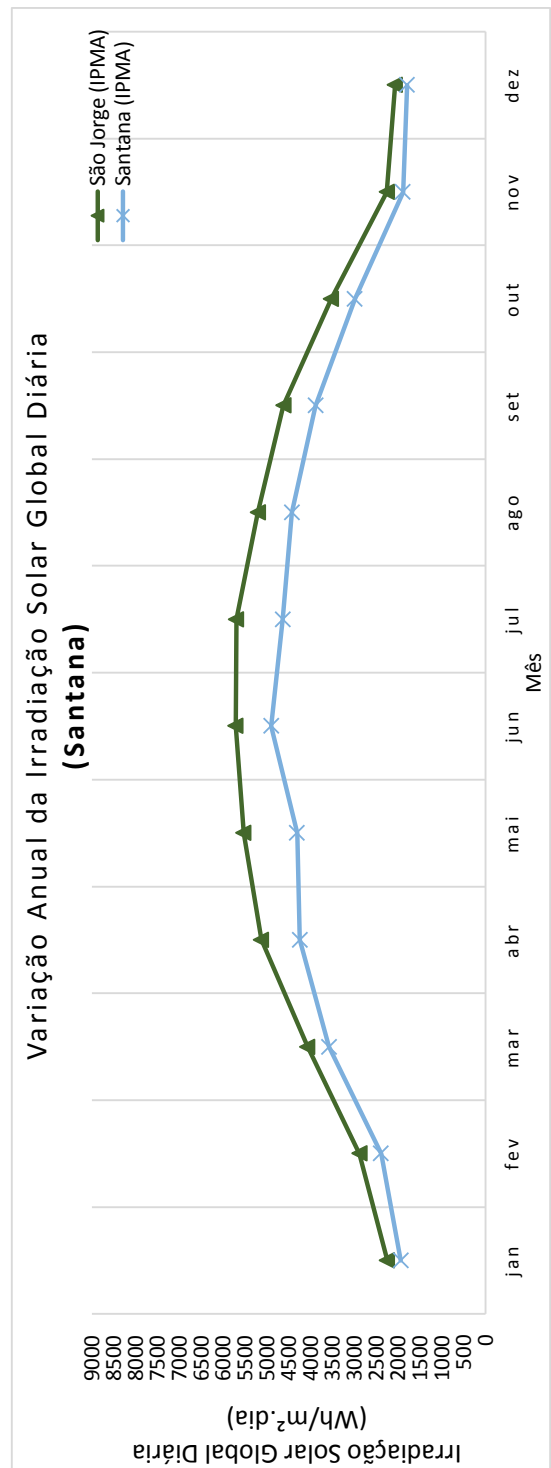
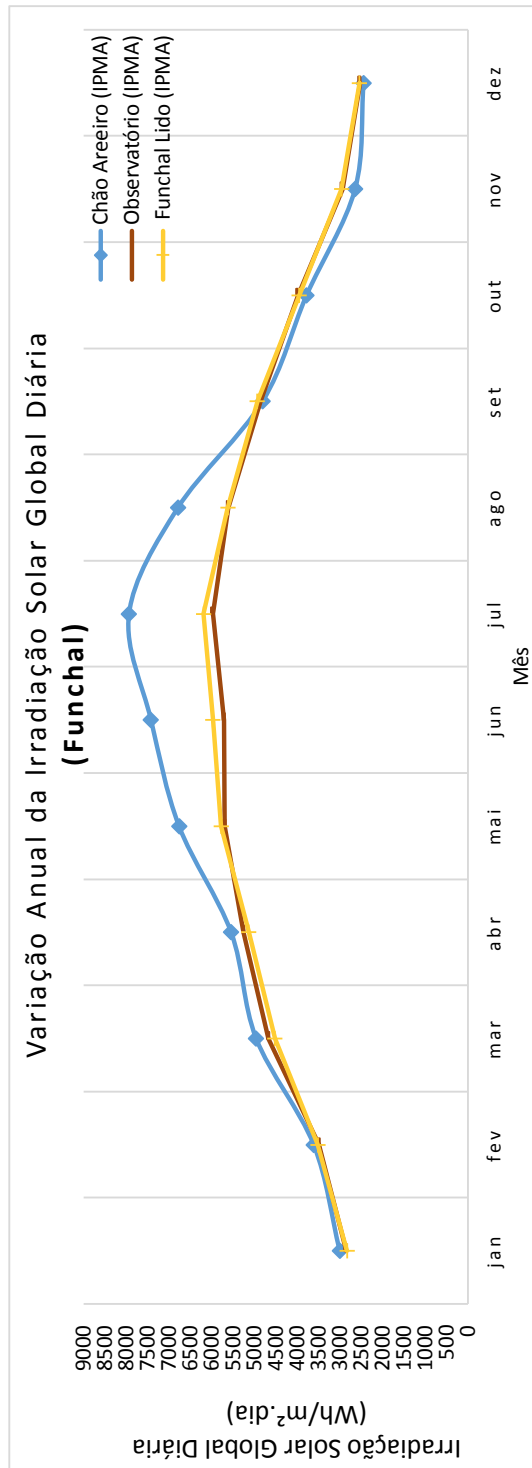
Dados	01-set-02	01-dez-14	01-out-03	01-abr-14	01-set-02	01-set-02	01-set-02	01-set-02	01-out-02
2002/15	Observatório (IPMA)	Aero. Sta. C. (IPMA)	Aero. P.S. (IPMA)	Porto Moniz (IPMA)	São Jorge (IPMA)	Santana (IPMA)	São Vicente (IPMA)	Bica Cana (IPMA)	Funchal Lido (IPMA)
Média	1632		1805	1228	1477	1261	1326	1621	1622

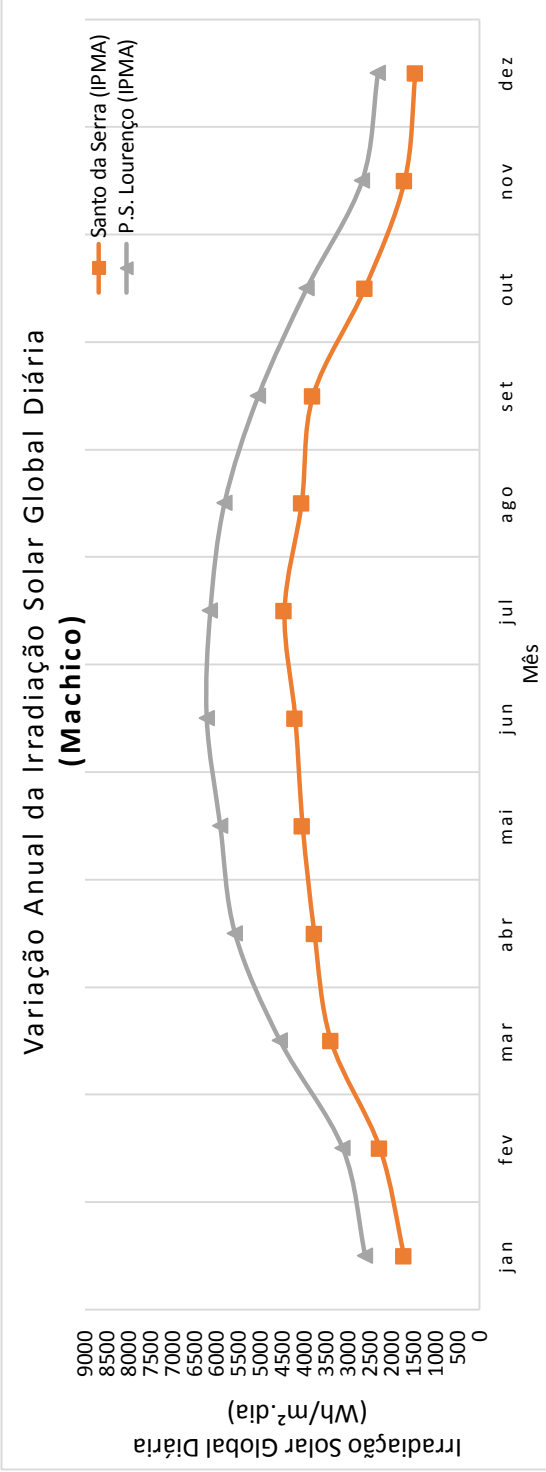
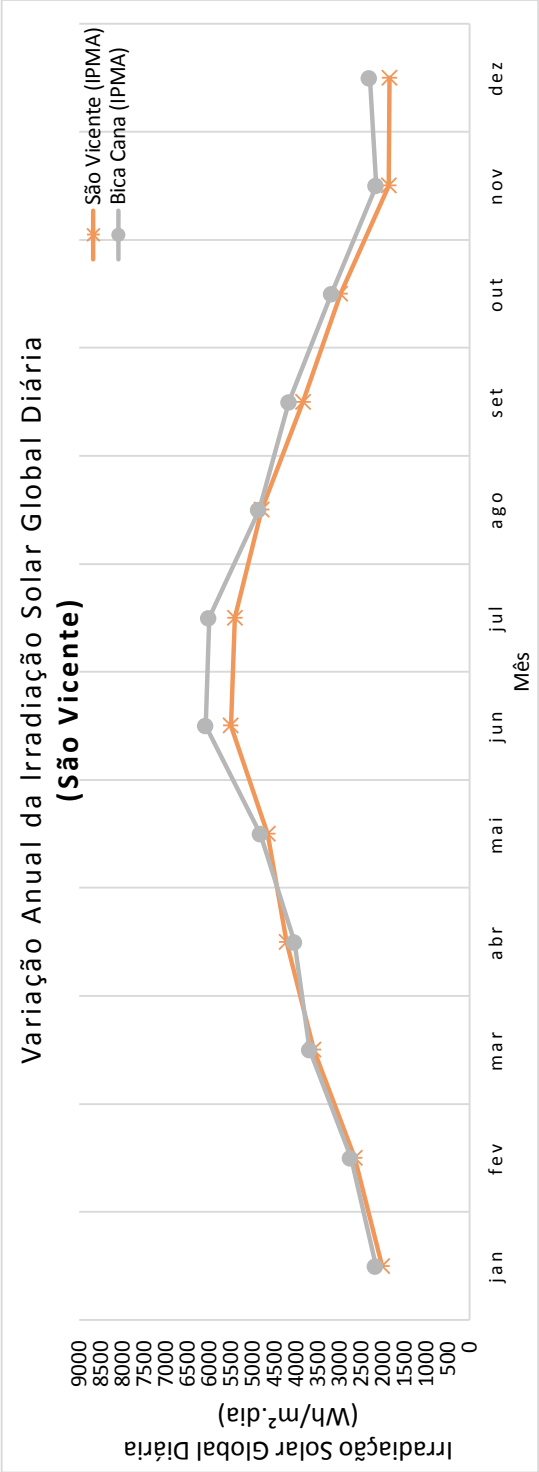
Dados	01-jan-15	01-set-02	01-set-10	01-jan-10	01-ago-10	01-set-10	01-set-02	01-jan-07
2002/15	Pico Alto (IPMA)	Chão Areeiro (IPMA)	Santo da Serra (IPMA)	P.S. Lourenço (IPMA)	L. da Terça (IPMA)	Quinta Grande (IPMA)	Lugar de Baixo (IPMA)	P. do Pargo (IPMA)
Média		1790	1103	1623	1536	1341	1747	1818

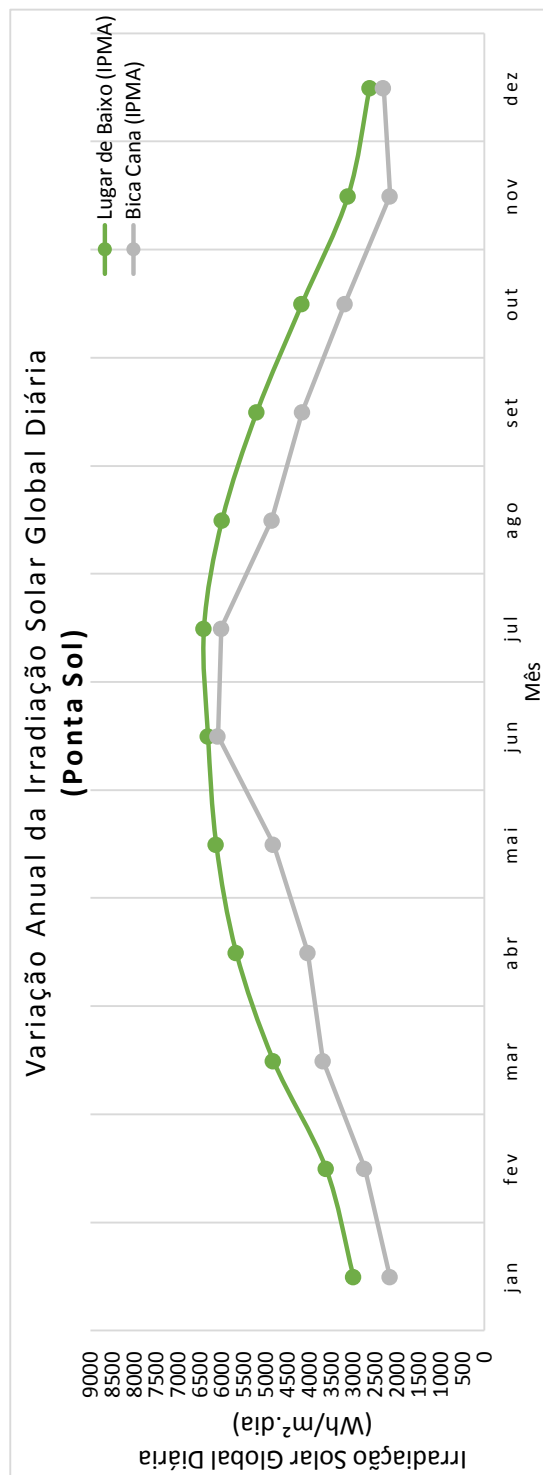
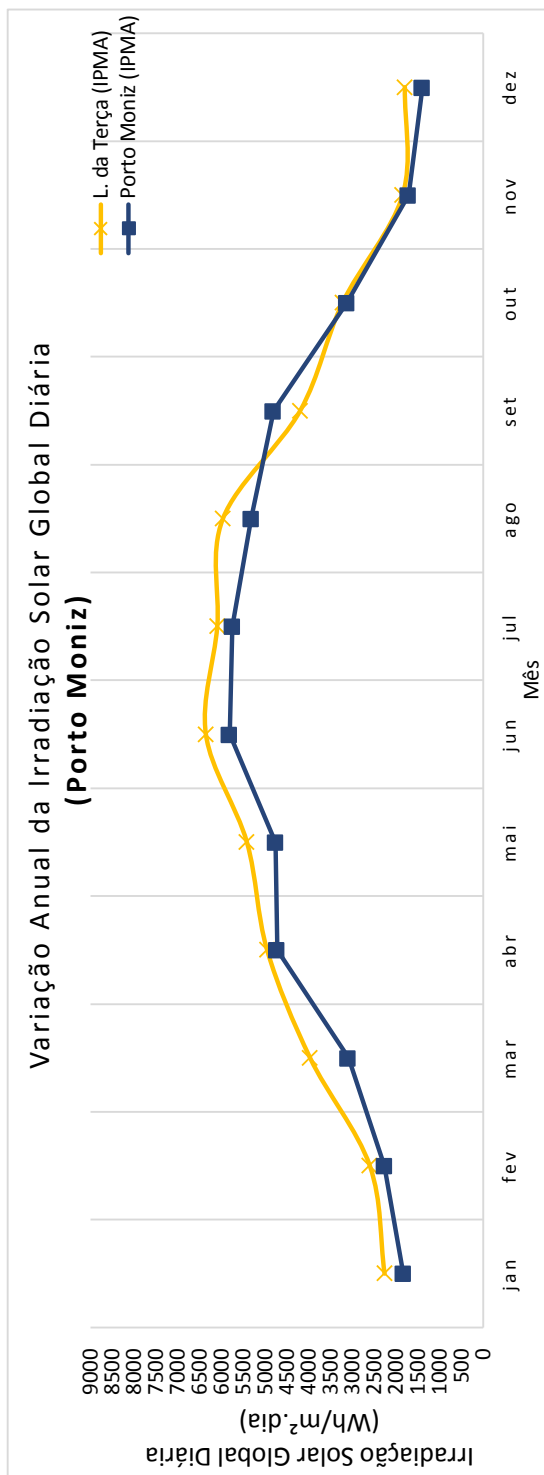


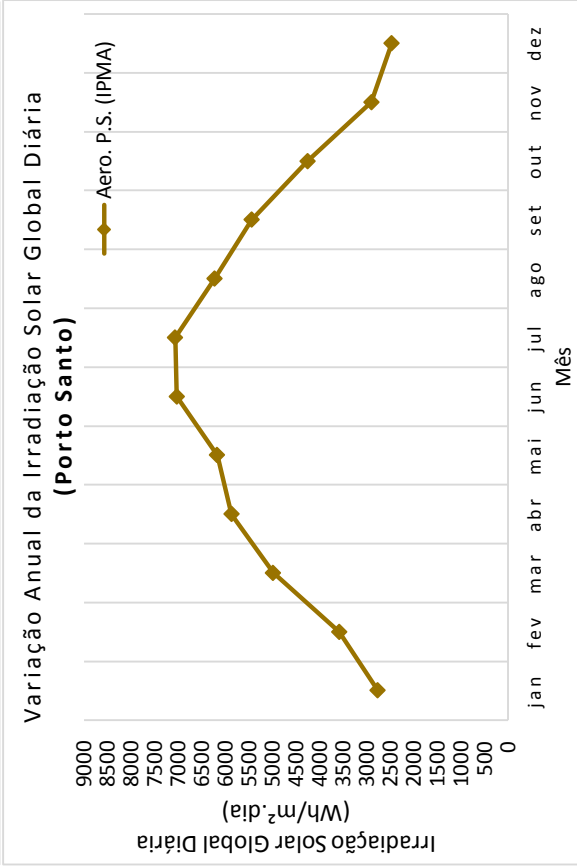
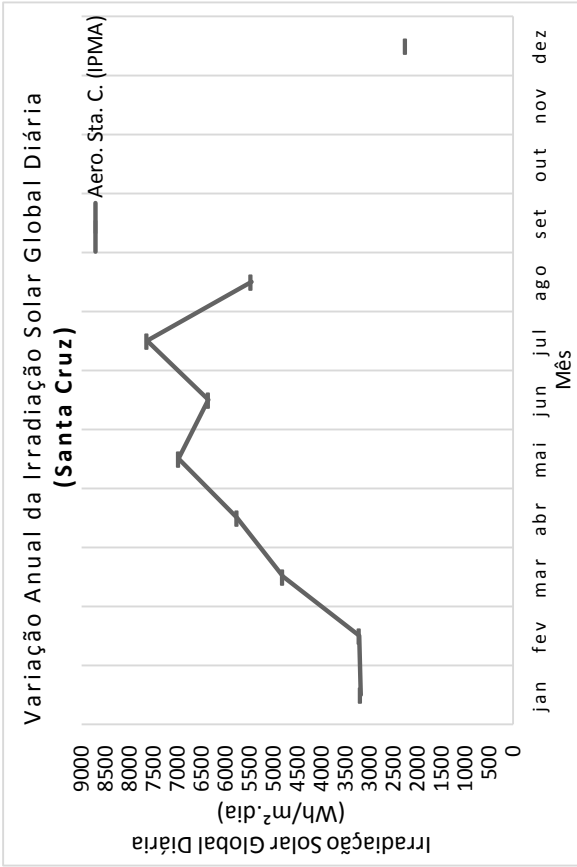
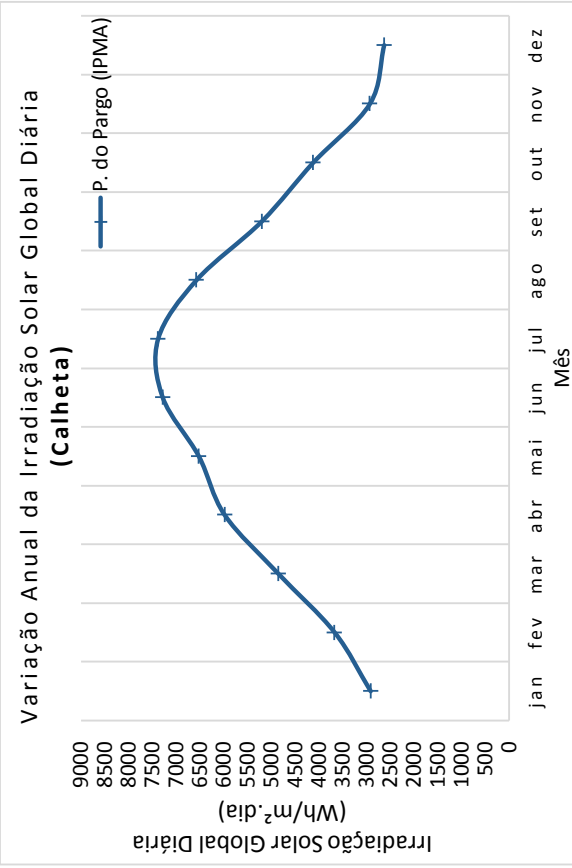
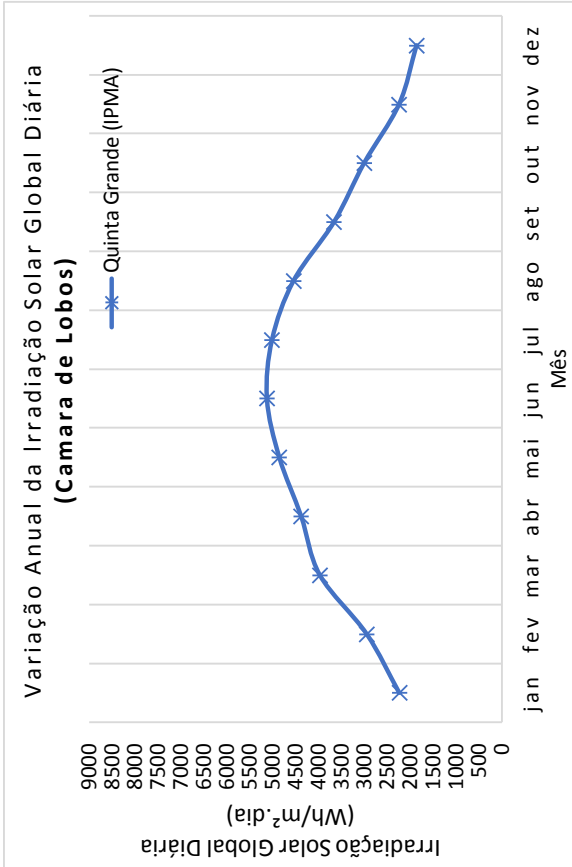
Anexo A.2.6 - Gráficos da variação anual da Irradiação Solar Global Diária das EMAs da rede IPMA (Wh/m².dia)







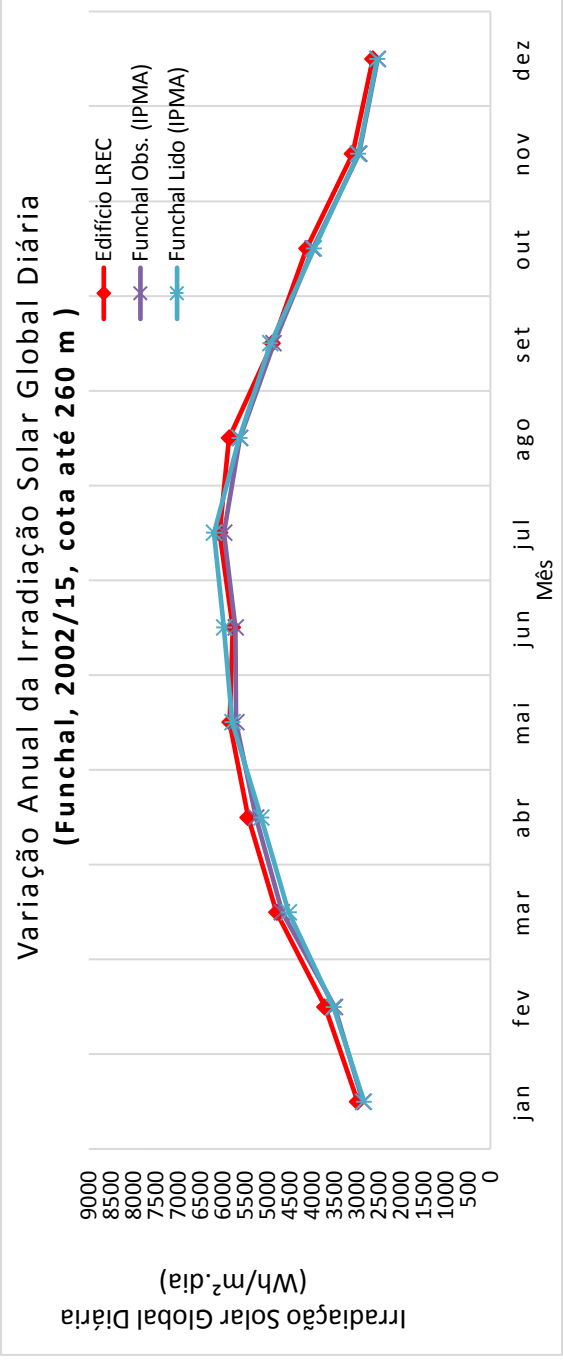
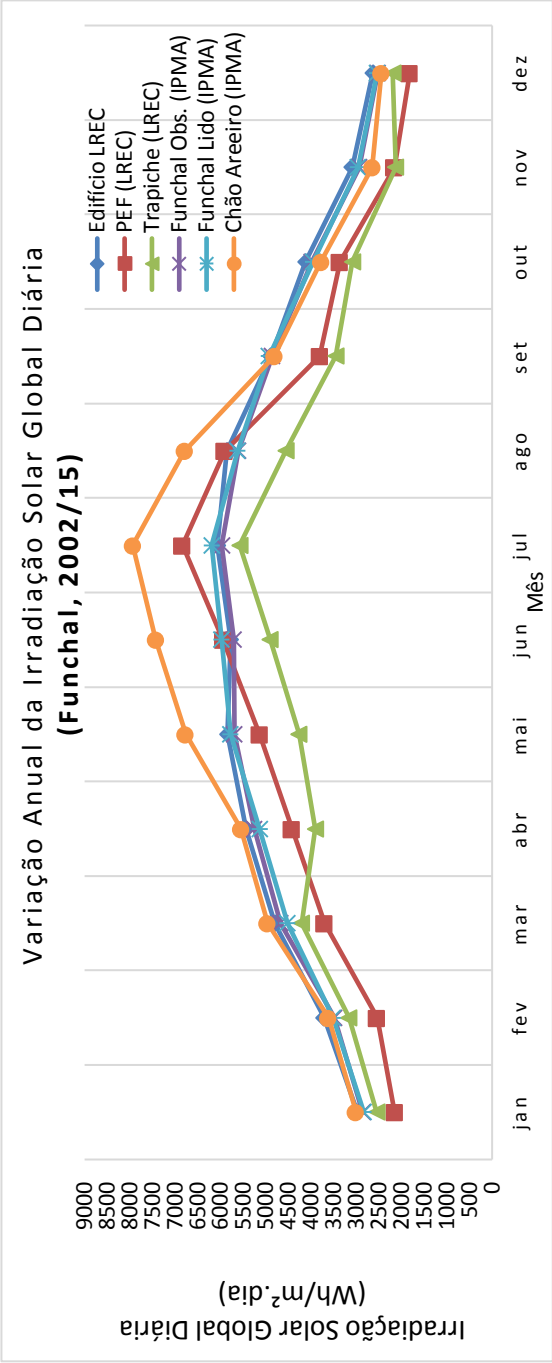


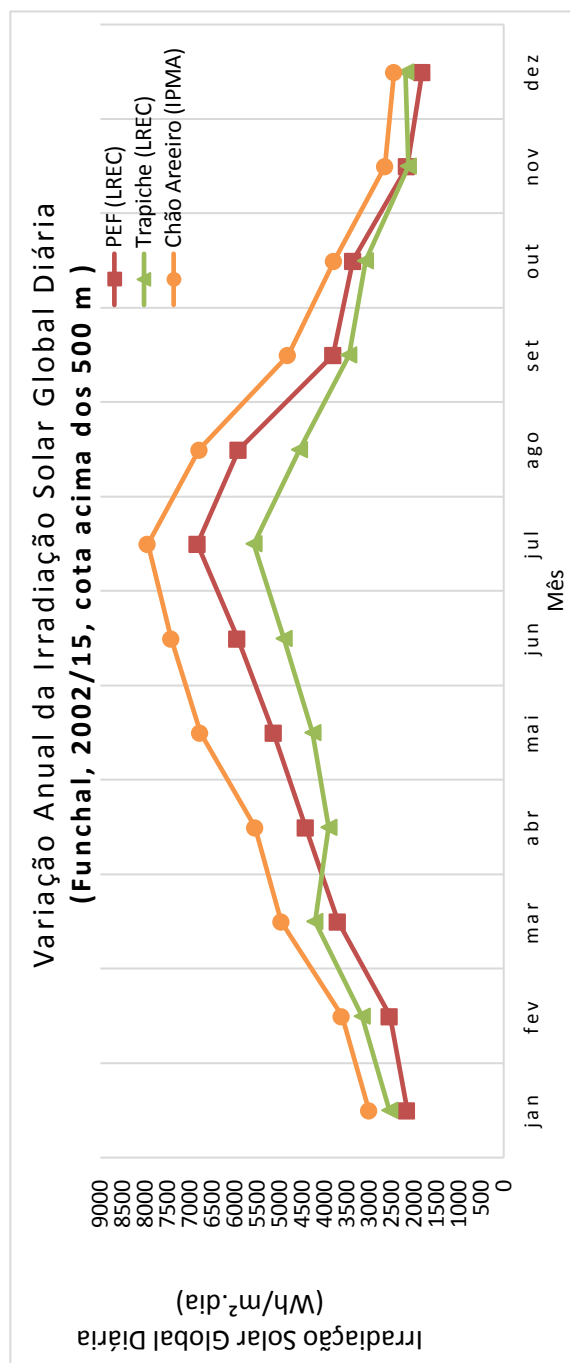


Anexo A.3 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS REGISTOS, DAS EMAS DA REDE LREC E OS DA REDE IPMA, POR CONCELHO

Anexo A.3.1 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho do Funchal (2005/15)

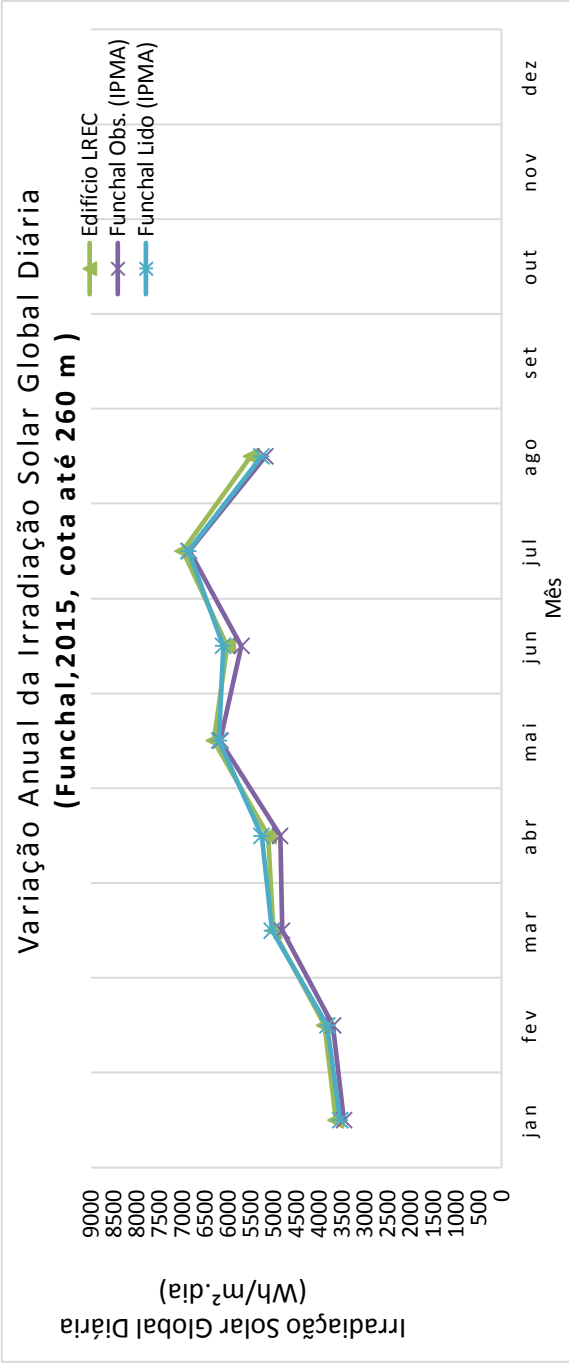
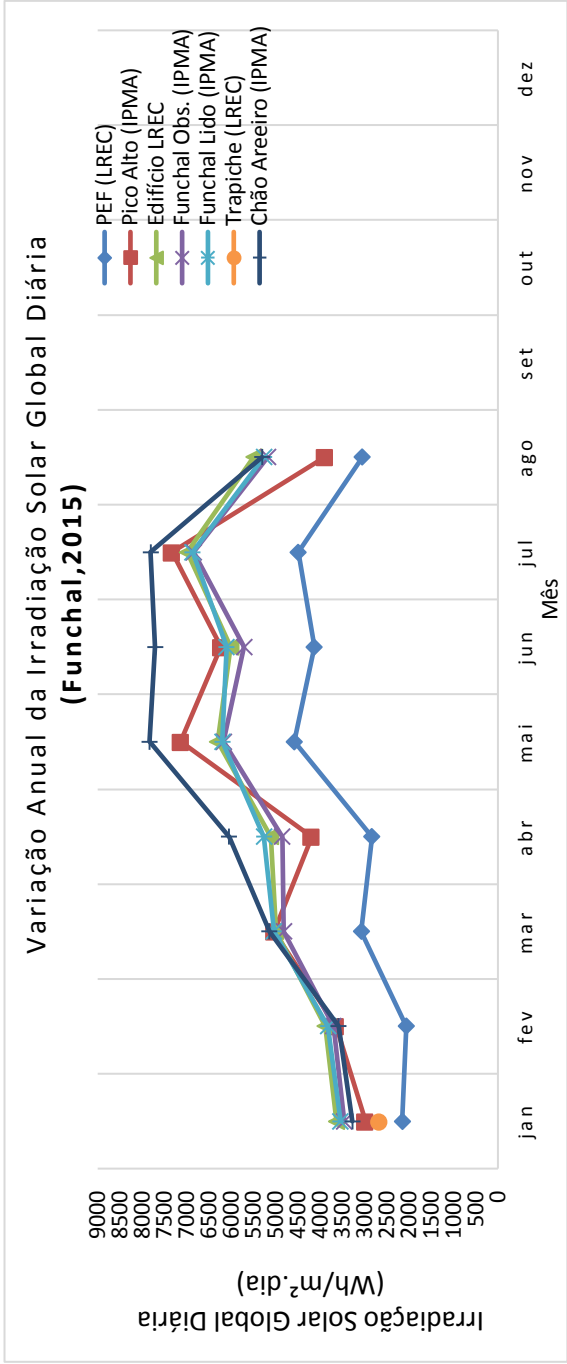
1º mês de envio	01-jun-05	01-set-06	01-set-11	01-set-02	01-out-02	01-set-02	01-jan-15
	Edifício LREC	PEF (LREC)	Trapiche (LREC)	Funchal Obs. (IPMA)	Funchal Lido (IPMA)	Chão Areeiro (IPMA)	Pico Alto (IPMA)
	alt. 258m	alt. 1300m	alt. 580m	alt. 58m	alt. 25m	alt. 1590m	alt. 1118
jan	2977	2152	2544	2855	2834	3003	2976
fev	3710	2537	3160	3486	3518	3613	3640
mar	4795	3700	4209	4671	4520	4959	5032
abr	5431	4420	3901	5254	5135	5546	4186
mai	5839	5132	4262	5695	5781	6766	7130
jun	5775	5938	4904	5707	5972	7422	6227
jul	6068	6836	5576	5971	6193	7937	7328
ago	5858	5908	4551	5608	5621	6790	3891
set	4885	3806	3452	4857	4929	4811	
out	4116	3357	3080	3980	3952	3779	
nov	3091	2155	2126	2938	2963	2644	
dez	2634	1817	2190	2525	2538	2445	
Média	4598	3980	3663	4462	4496	4976	5051

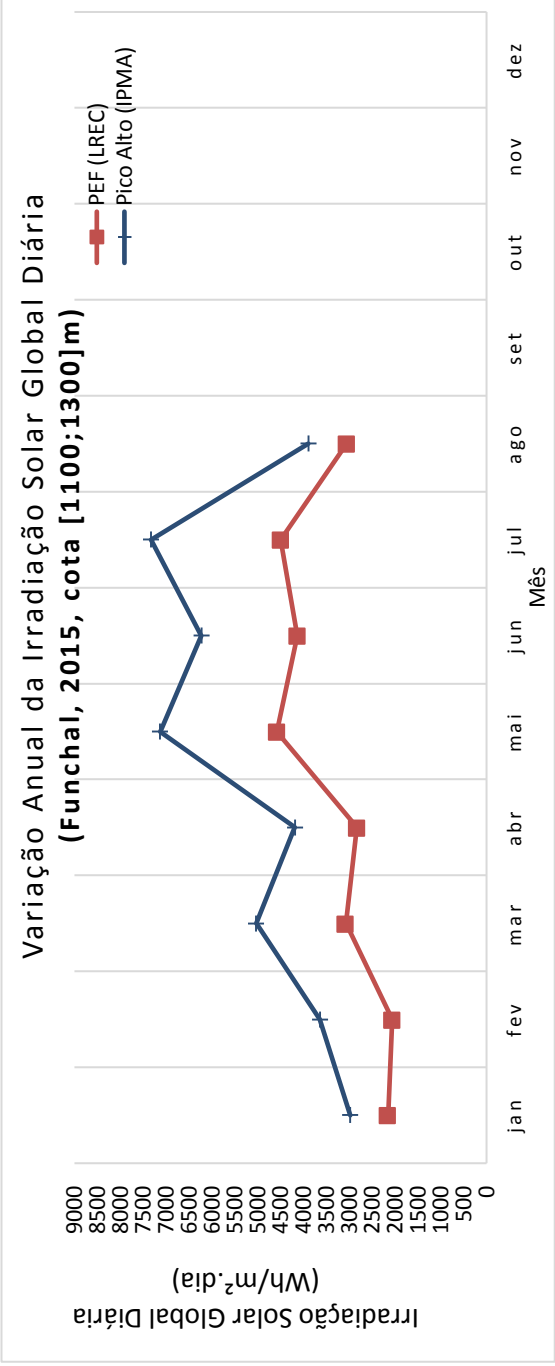
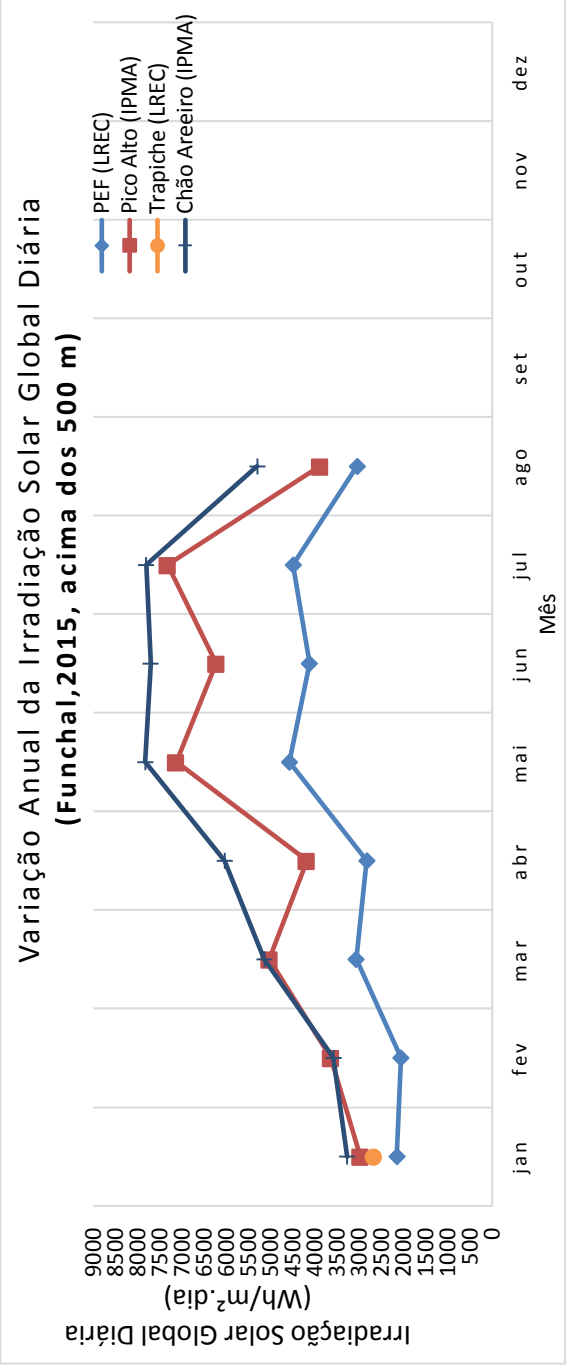




Anexo A.3.1 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho do Funchal (2015)

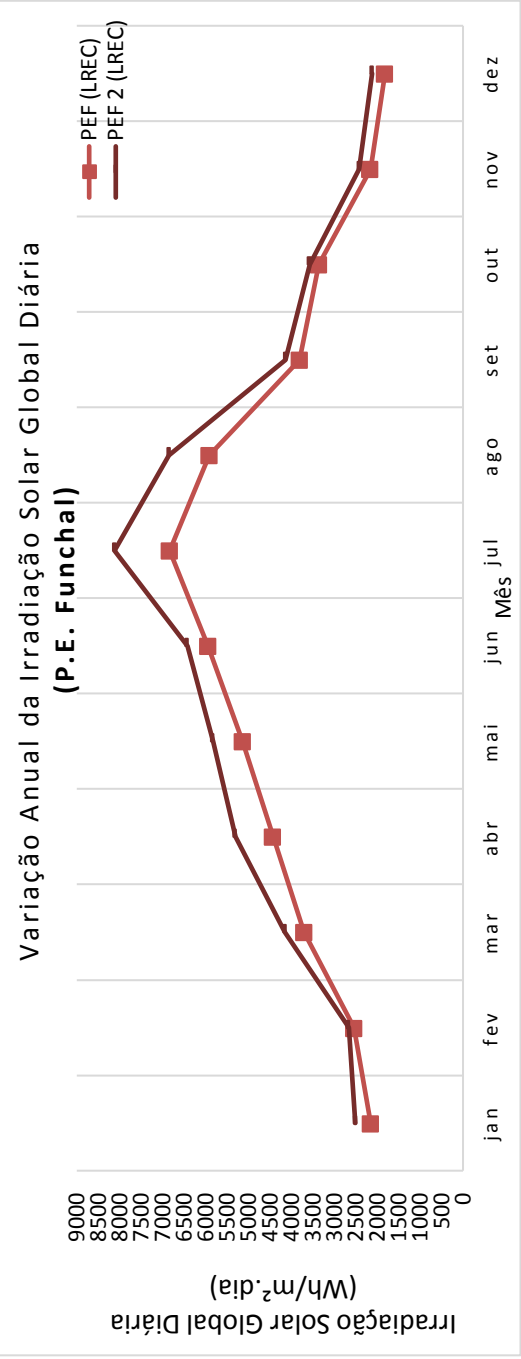
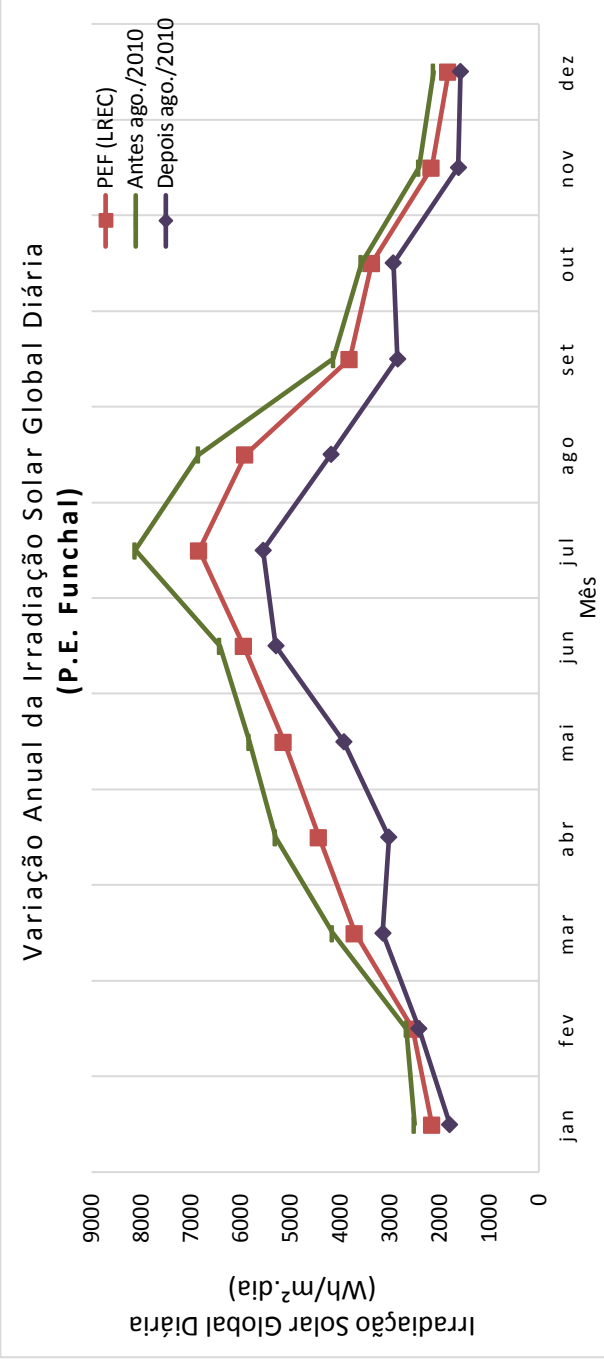
ΔISGD	Edifício LREC	PEF (LREC)	Trapiche (LREC)	Funchal Obs. (IPMA)	Funchal Lido (IPMA)	Chão Areeiro (IPMA)	Pico Alto (IPMA)
jan	3631	2152	2669	3456	3538	3275	2976
fev	3887	2060		3696	3820	3583	3640
mar	4997	3070		4811	5035	5142	5032
abr	5111	2831		4850	5262	6044	4186
mai	6307	4579		6169	6194	7835	7130
jun	6011	4127		5703	6104	7707	6227
jul	6987	4492		6844	6864	7811	7328
ago	5494	3049		5176	5260	5304	3891
set							
out							
nov							
dez							
Média	5303	3295	2669	5088	5260	5838	5051

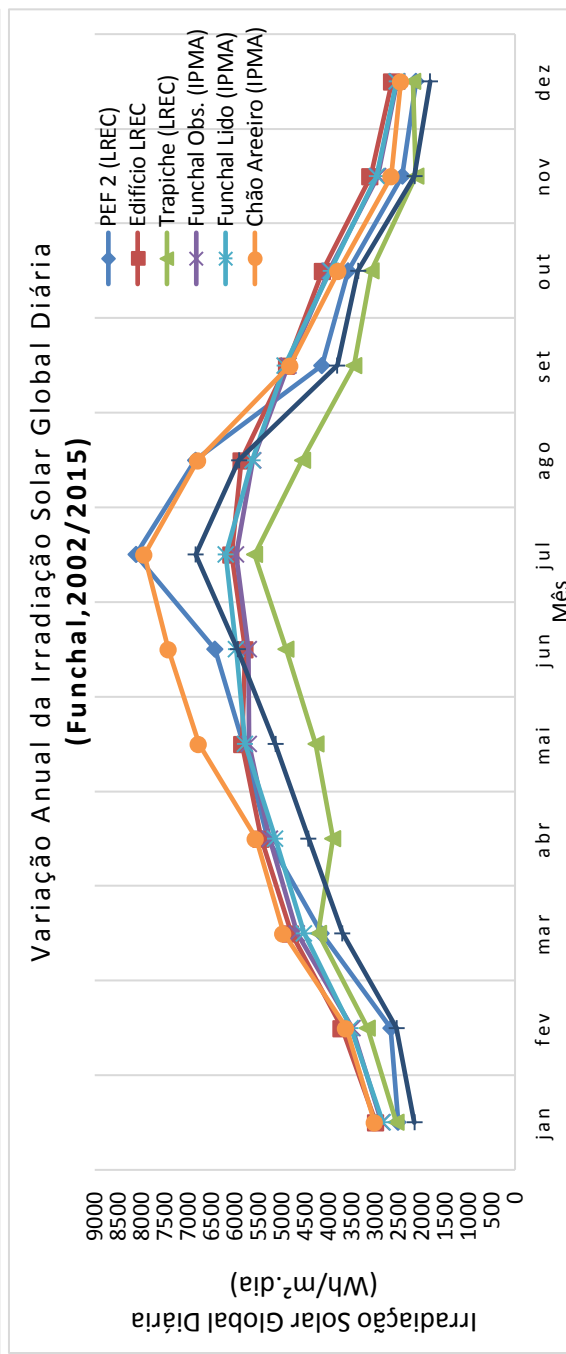
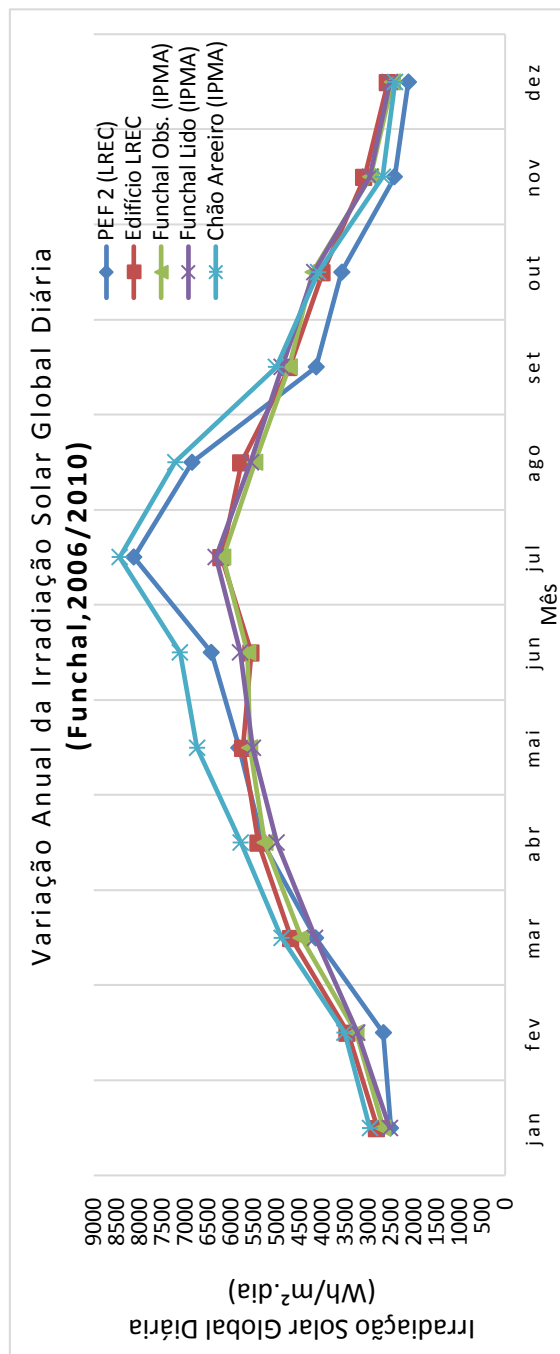




Anexo A.3.2 - Caso de estudo: Concelho do Funchal (2006/10) - EMA do PE do Funchal

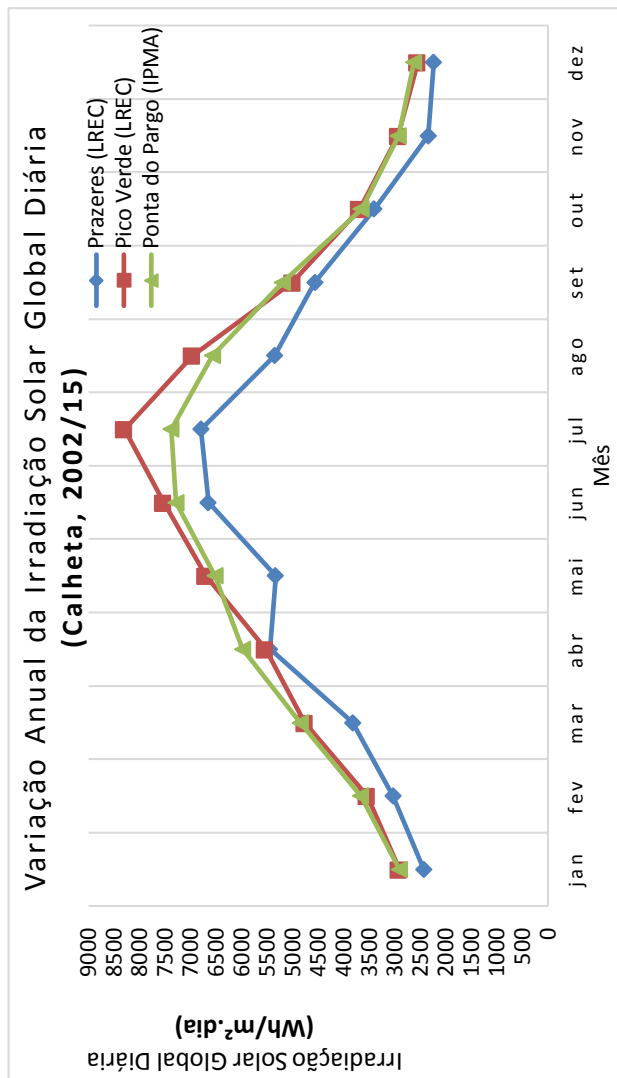
Variação anual da ISGD das EMAs do concelho do Funchal, até agosto de 2010								
	Antes ago./2010	Depois ago./2010	ΔISGD	PEF 2 (LREC)	Edifício LREC	Funchal Obs. (IPMA)	Funchal Lido (IPMA)	Chão Areeiro (IPMA)
jan	2506	1796	-710	2506	2800	2670	2522	2956
fev	2662	2413	-250	2662	3438	3260	3232	3513
mar	4151	3141	-1010	4151	4683	4468	4158	4892
abr	5302	3017	-2284	5302	5396	5256	4995	5781
mai	5825	3925	-1900	5825	5732	5586	5519	6738
jun	6424	5290	-1134	6424	5552	5631	5798	7112
jul	8121	5551	-2570	8121	6204	6171	6327	8436
ago	6845	4183	-2662	6845	5764	5470	5562	7218
set	4135	2842	-1293	4135	4714	4722	4881	5012
out	3572	2927	-646	3572	3990	4207	4178	4084
nov	2416	1621	-795	2416	3077	2943	2961	2681
dez	2118	1577	-541	2118	2563	2462	2519	2408
Média				4506	4493	4404	4388	5069





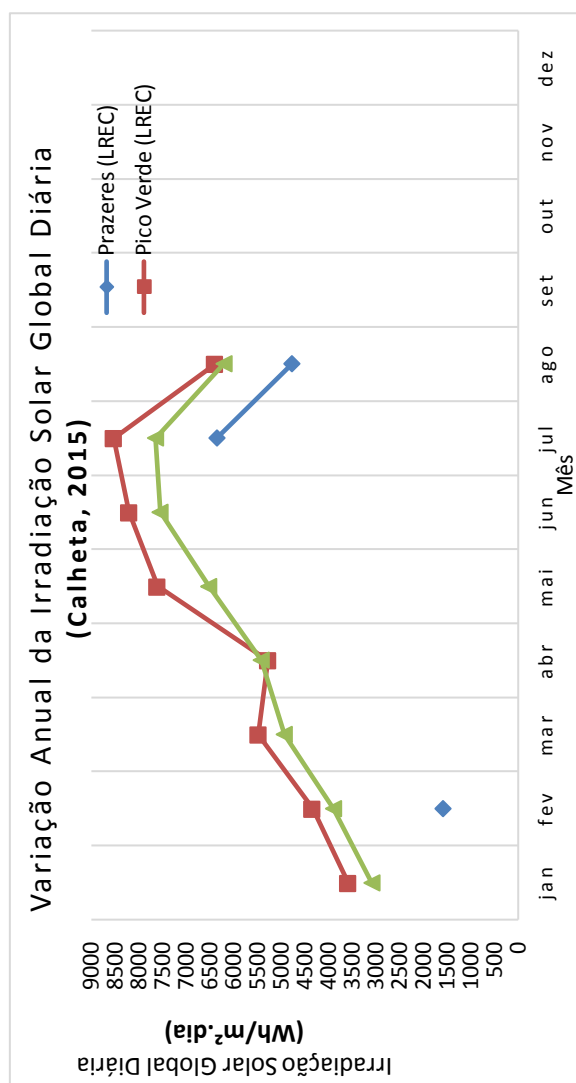
Anexo A.3.3 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho da Calheta (2002/15)

1º mês de envio	01-jun-11		01-jul-05		01-jan-07	
	Prazeres (LREC)		Pico Verde (LREC)		Ponta do Pargo (IPMA)	
	alt. 648m		alt. 1020m		alt. 298m	
jan	2434		2915		2910	
fev	3032		3540		3667	
mar	3824		4763		4851	
abr	5448		5536		5980	
mai	5338		6700		6523	
jun	6651		7531		7283	
jul	6798		8294		7379	
ago	5354		6968		6571	
set	4566		5001		5197	
out	3400		3692		3655	
nov	2343		2932		2927	
dez	2237		2548		2626	
Média	4285		5035		4964	



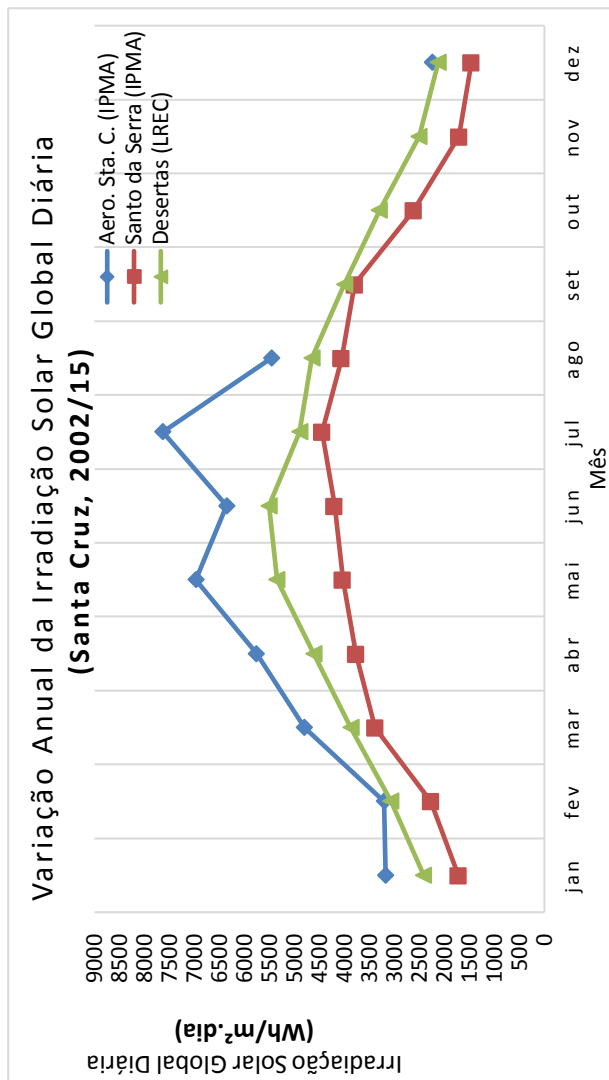
Anexo A.3.3 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho da Calheta (2015)

ΔISGD	Prazeres (LREC)	Pico Verde (LREC)	Ponta do Pargo (IPMA)
jan		3586	3091
fev	1588	4337	3896
mar		5480	4934
abr		5277	5417
mai		7606	6521
jun		8206	7553
jul	6355	8528	7648
ago	4771	6388	6207
set			
out			
nov			
dez			
Média	4238	6176	5658

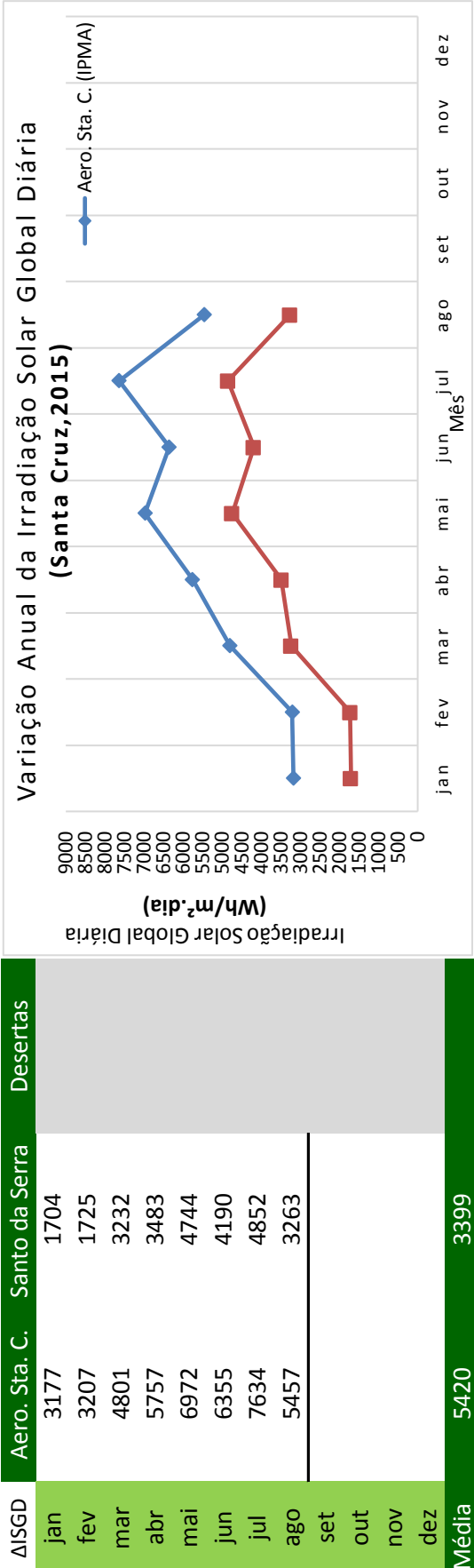


Anexo A.3.4 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho da Santa Cruz (2002/15)

1º mês de envio	01-12-2014 Aero. Sta. C. (IPMA) alt. 58m	23-08-2010 Santo da Serra (IPMA) alt. 660m	01-07-2007 Desertas (LREC) alt. 10m
jan	3177	1718	2420
fev	3207	2269	3069
mar	4801	3387	3874
abr	5757	3766	4613
mai	6972	4034	5348
jun	6355	4201	5508
jul	7634	4447	4896
ago	5457	4055	4654
set		3796	3998
out		2613	3302
nov		1706	2508
dez	2244	1461	2125
Média	5067	3121	3860

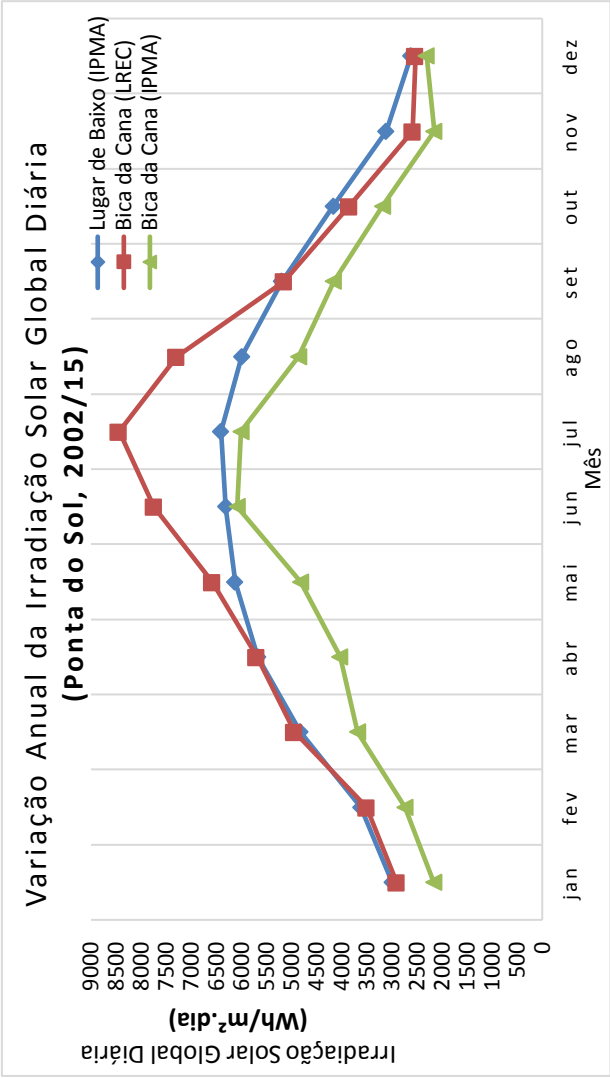


Anexo A.3.4 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho da Santa Cruz (2015)

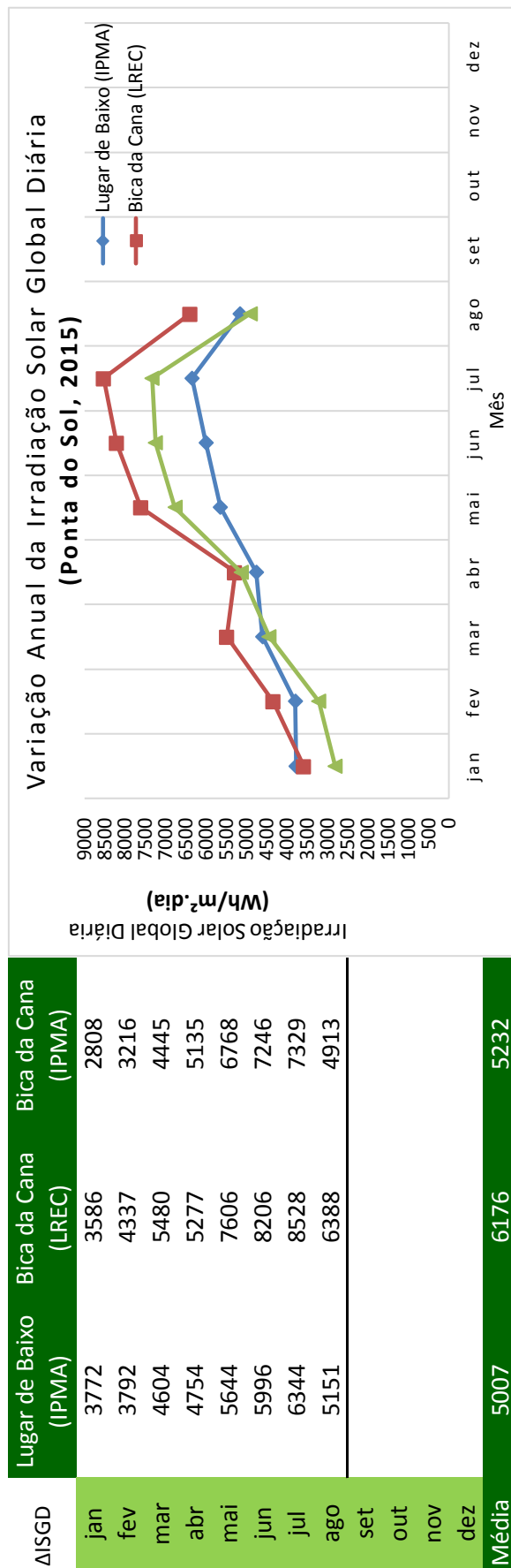


Anexo A.3.5 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho da Ponta do Sol (2002/15)

1º mês de envio	01-set-02 Lugar de Baixo (IPMA) alt. 40m	01-out-05 Bica da Cana (LREC) alt. 1600m	01-set-10 Bica da Cana (IPMA) alt. 1560m
jan	2992	2905	2159
fev	3619	3501	2734
mar	4823	4942	3684
abr	5671	5694	4031
mai	6126	6578	4818
jun	6313	7739	6084
jul	6405	8436	6006
ago	5990	7290	4854
set	5195	5151	4159
out	4165	3847	3182
nov	3111	2582	2152
dez	2618	2526	2305
Média	4752	5099	3847

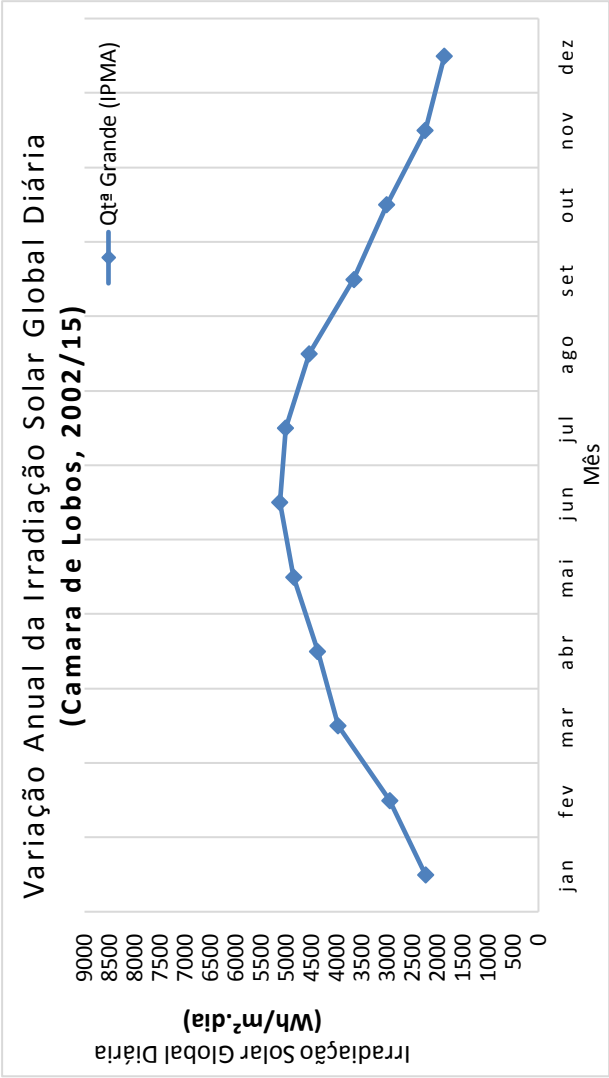


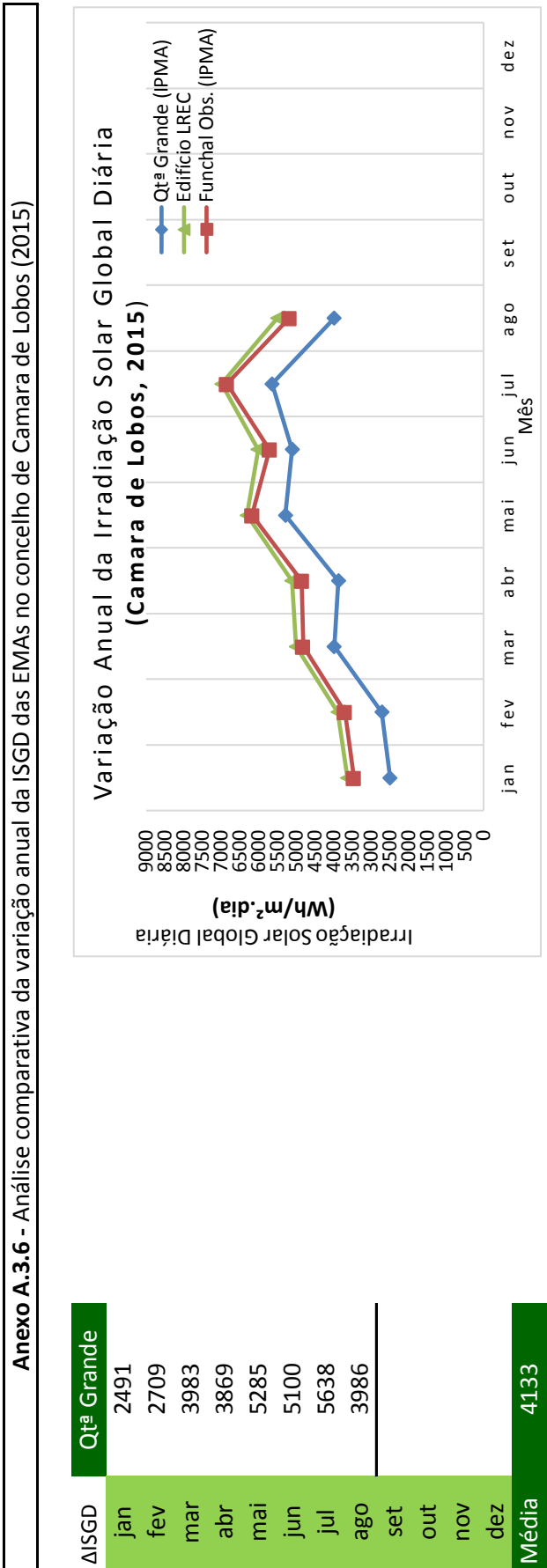
Anexo A.3.5 -Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho da Ponta do Sol (2015)



Anexo A.3.6 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho de Camara de Lobos (2002/15)

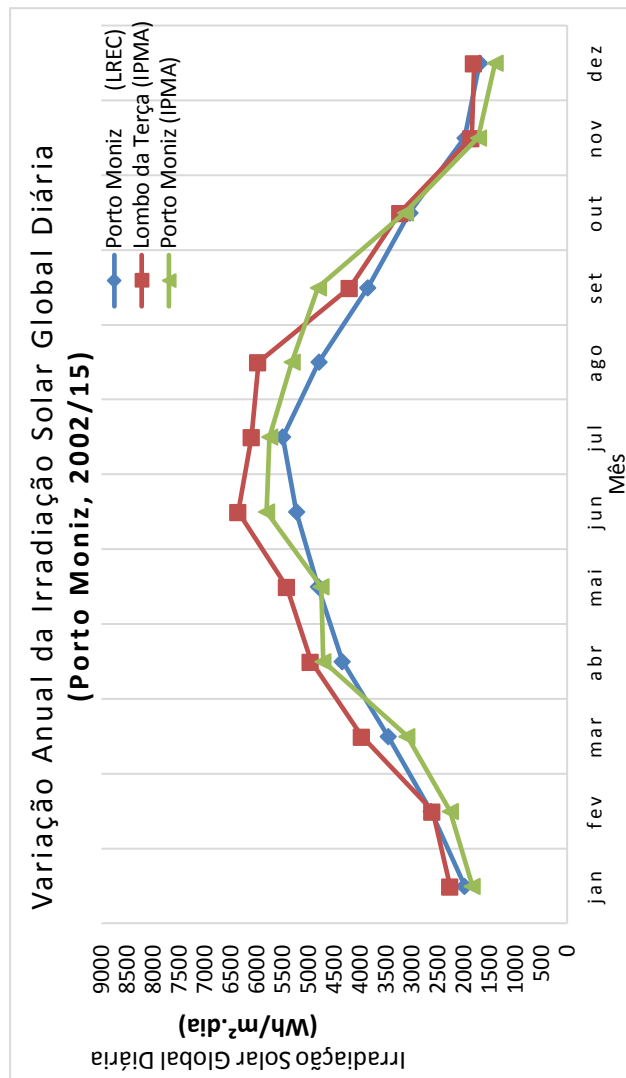
1º mês de envio	01-set-10	Qtª Grande (IPMA)
		alt. 580m
jan	2239	
fev	2950	
mar	3971	
abr	4378	
mai	4855	
jun	5125	
jul	5013	
ago	4545	
set	3661	
out	3006	
nov	2243	
dez	1863	
Média	3654	





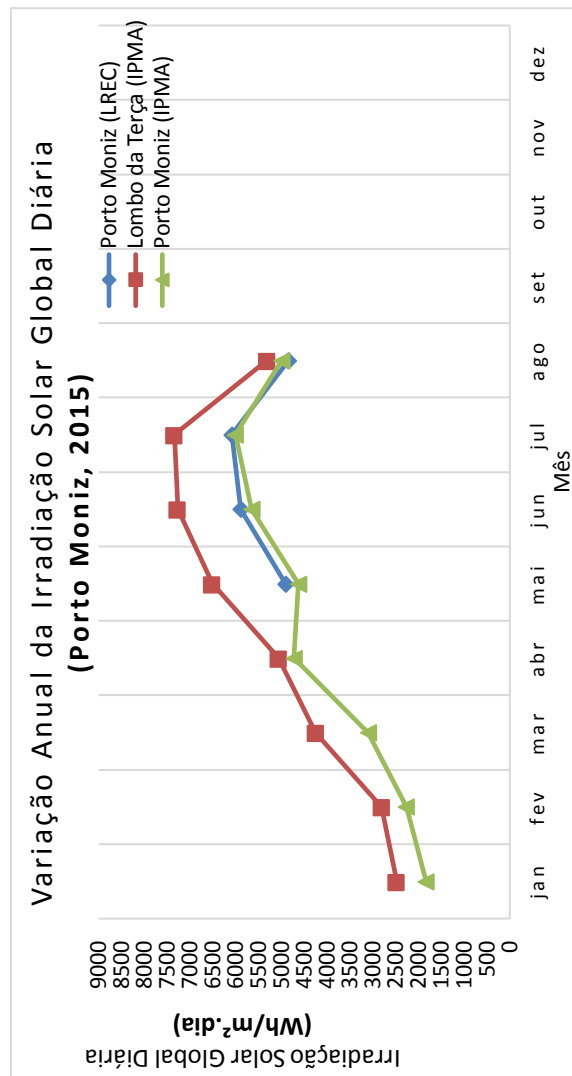
Anexo A.3.7 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho do Porto Moniz (2002/15)

1º mês de envio	01-out-05		01-ago-10		01-abr-14	
	Porto Moniz (LREC)	alt. 675m	Lombo da Terça (IPMA)	alt. 931m	Porto Moniz (IPMA)	alt. 35m
jan		1984		2261		1832
fev		2631		2600		2262
mar		3463		3968		3094
abr		4346		4953		4720
mai		4810		5416		4756
jun		5233		6356		5808
jul		5494		6095		5748
ago		4797		5966		5316
set		3851		4195		4808
out		3040		3226		3127
nov		1978		1847		1713
dez		1693		1796		1392
Média		3610		4057		3715



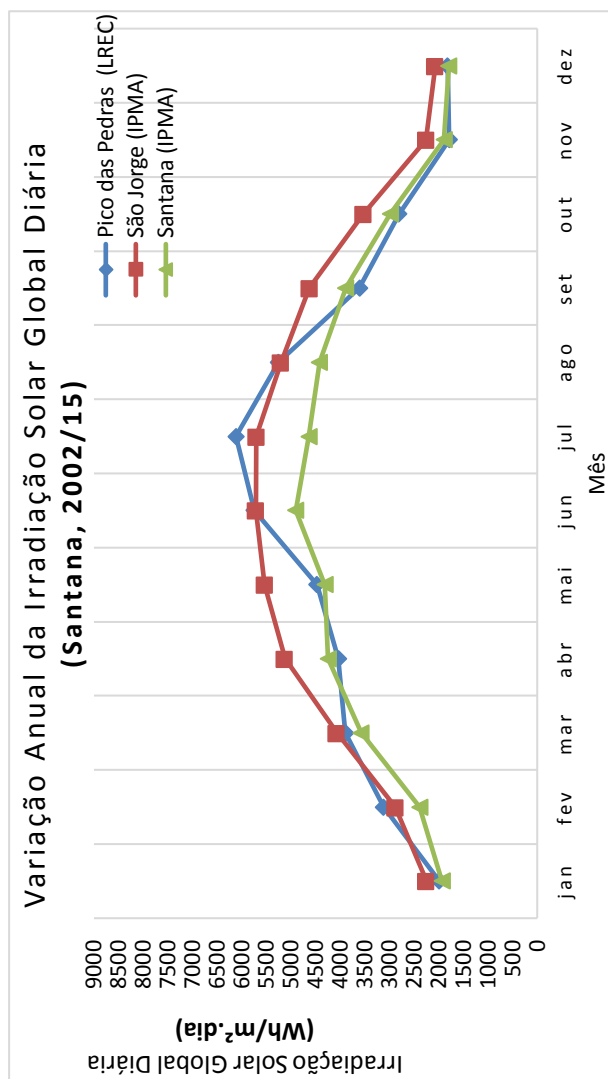
Anexo A.3.7 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho do Porto Moniz (2015)

ΔISGD	Porto Moniz (LREC)	Lombo da Terça (IPMA)	Porto Moniz (IPMA)
jan		2473	1832
fev		2805	2262
mar		4245	3094
abr		5061	4722
mai	4906	6513	4625
jun	5888	7266	5649
jul	6085	7340	6004
ago	4842	5312	4989
set			
out			
nov			
dez			
Média	5430	5127	4147

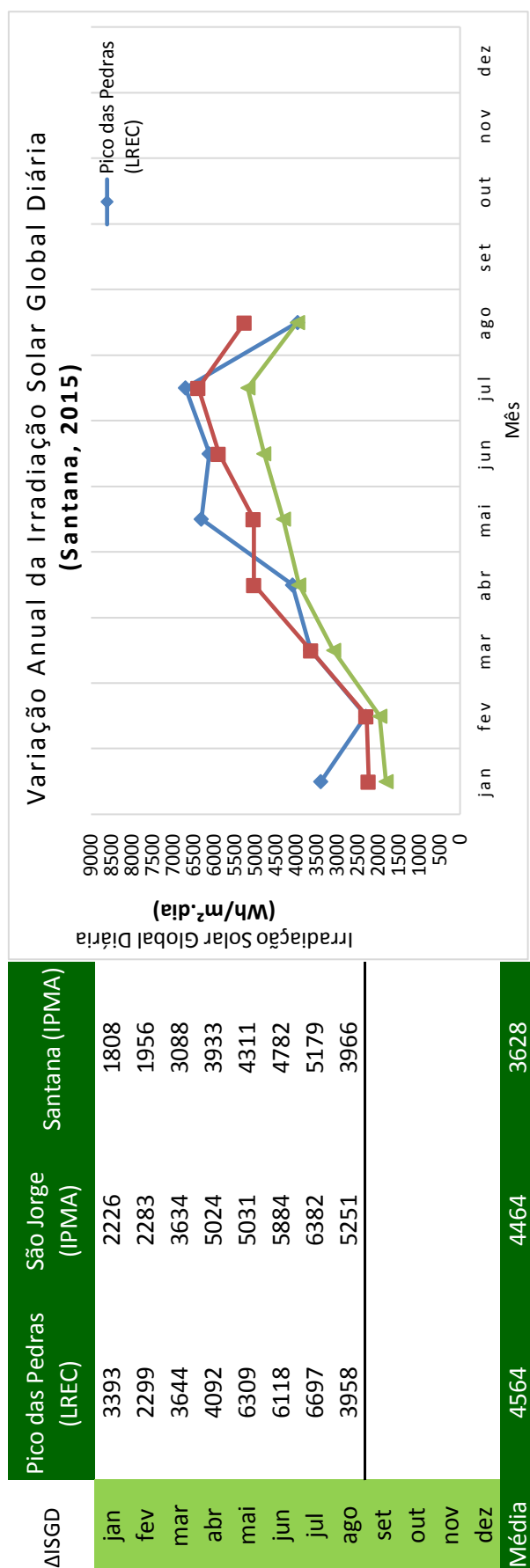


Anexo A.3.8 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho de Santana (2002/15)

1º mês de envio	01-mai-10	01-set-02	01-set-10
	Pico das Pedras (LREC)	São Jorge (IPMA)	Santana (IPMA)
	alt. 920m	alt. 257m	alt. 380m
jan	1990	2251	1934
fev	3120	2880	2385
mar	3897	4070	3575
abr	4036	5125	4245
mai	4471	5531	4311
jun	5749	5711	4902
jul	6117	5702	4635
ago	5255	5204	4423
set	3607	4623	3885
out	2809	3529	2985
nov	1788	2258	1890
dez	1821	2068	1792
Média	3722	4079	3413

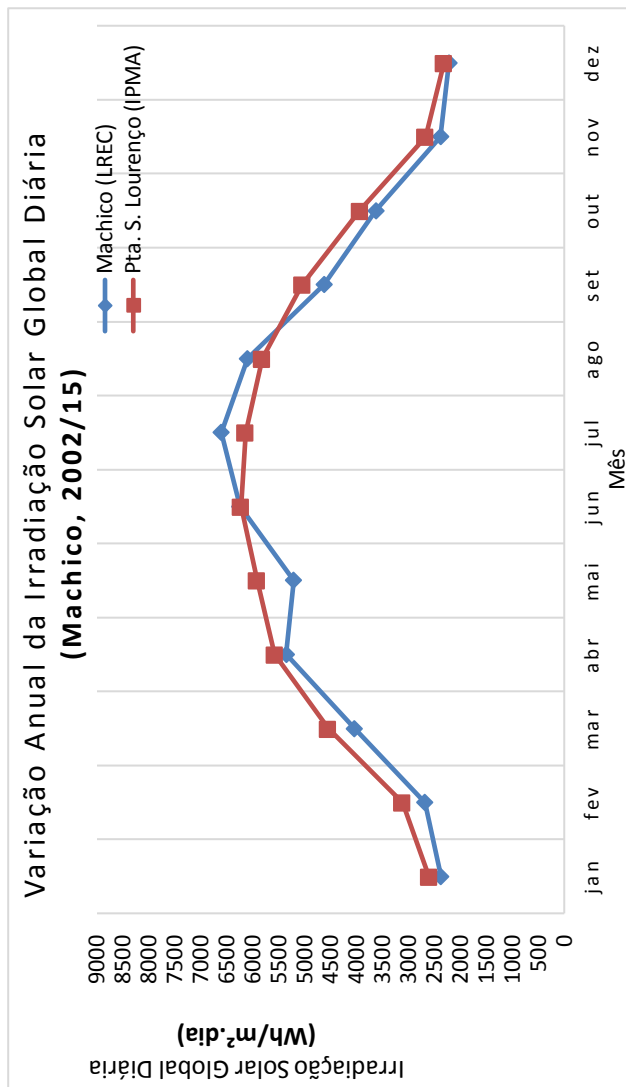


Anexo A.3.8 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho de Santana (2015)



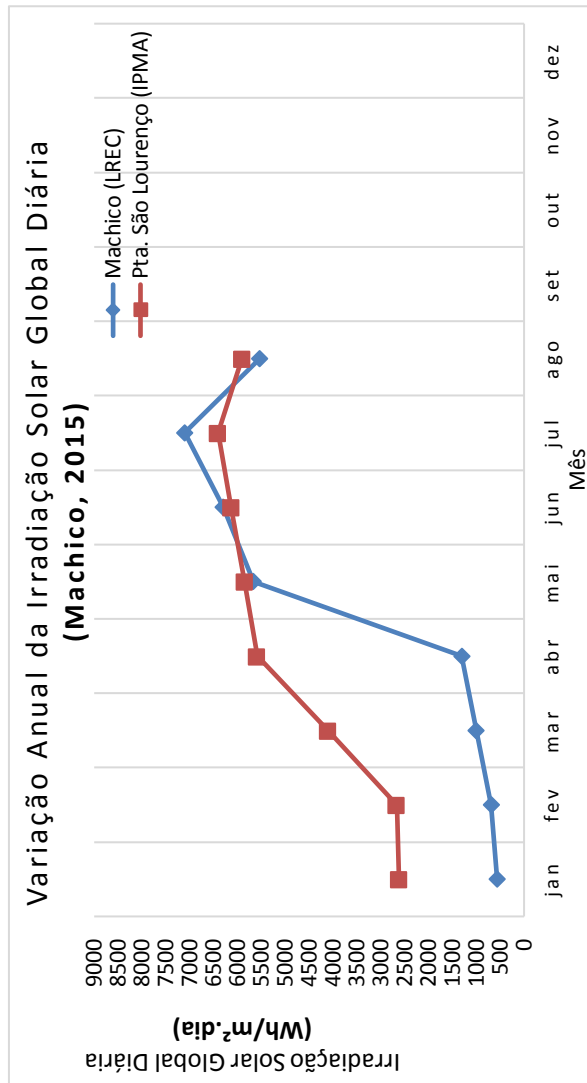
Anexo A.3.9 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho de Machico (2002/15)

1º mês de envio	01-jan-09		01-jan-10	
	Machico (LREC)		Pta. S. Lourenço (IPMA)	
	alt. 170m	alt. 133m		
jan	2374	2606		
fev	2683	3119		
mar	4043	4549		
abr	5356	5577		
mai	5212	5914		
jun	6249	6223		
jul	6604	6141		
ago	6104	5817		
set	4627	5044		
out	3630	3936		
nov	2381	2675		
dez	2221	2315		
Média	4290	4493		



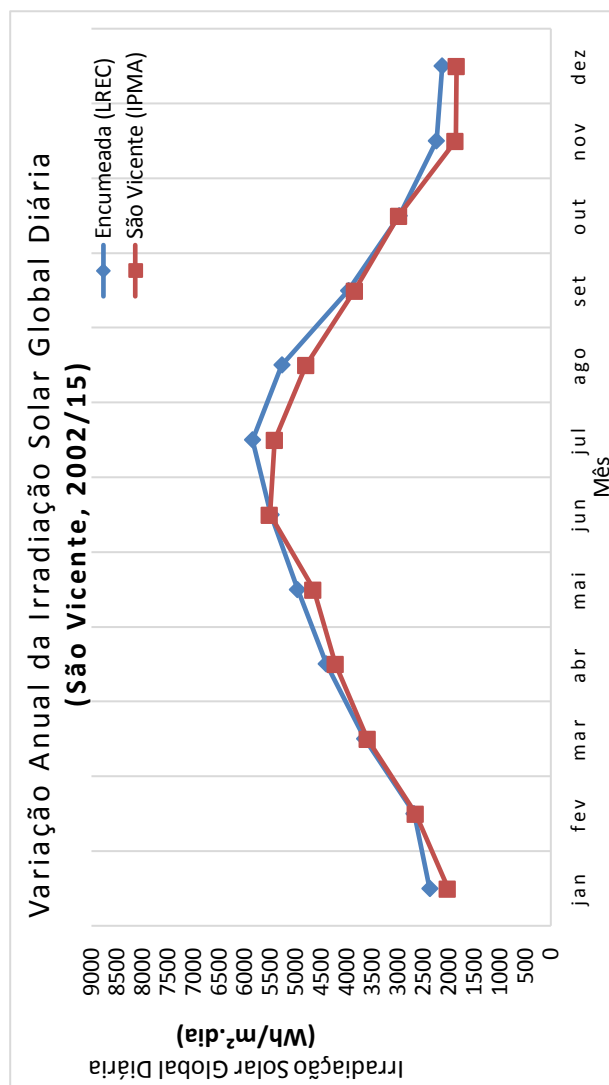
Anexo A.3.9 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho de Machico (2015)

ΔISGD	Machico (LREC)	Pta. São Lourenço (IPMA)
jan	564	2619
fev	688	2666
mar	1000	4108
abr	1304	5586
mai	5668	5852
jun	6300	6133
jul	7104	6404
ago	5535	5905
set		
out		
nov		
dez		
Média	3520	4909



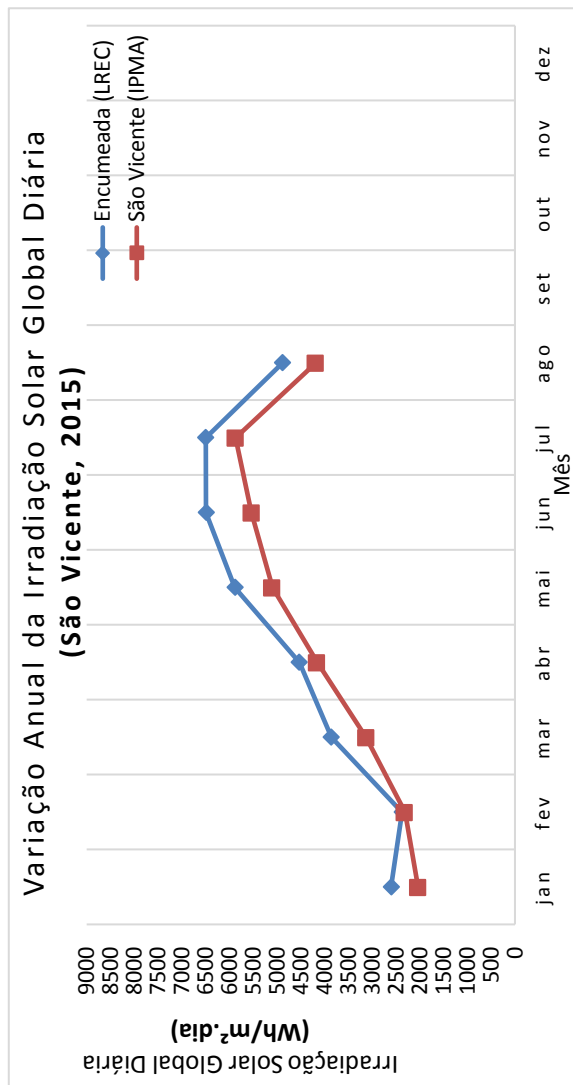
Anexo A.3.10 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho de São Vicente (2002/15)

1º mês de envio	01-jul-05 Encumeada (LREC) alt. 1017m	01-set-10 São Vicente (IPMA) alt. 97m
jan	2373	2016
fev	2677	2646
mar	3647	3592
abr	4397	4219
mai	4961	4648
jun	5483	5501
jul	5844	5409
ago	5267	4794
set	3964	3840
out	2966	2977
nov	2240	1863
dez	2128	1847
Média	3829	3613



Anexo A.3.10 - Análise comparativa da variação anual da ISGD das EMAs no concelho de São Vicente (2015)

ΔISGD	Encumeada (LREC)	São Vicente (IPMA)
jan	2602	2037
fev	2373	2311
mar	3861	3124
abr	4535	4158
mai	5885	5098
jun	6491	5532
jul	6497	5871
ago	4884	4182
set		
out		
nov		
dez		
Média	4641	4039



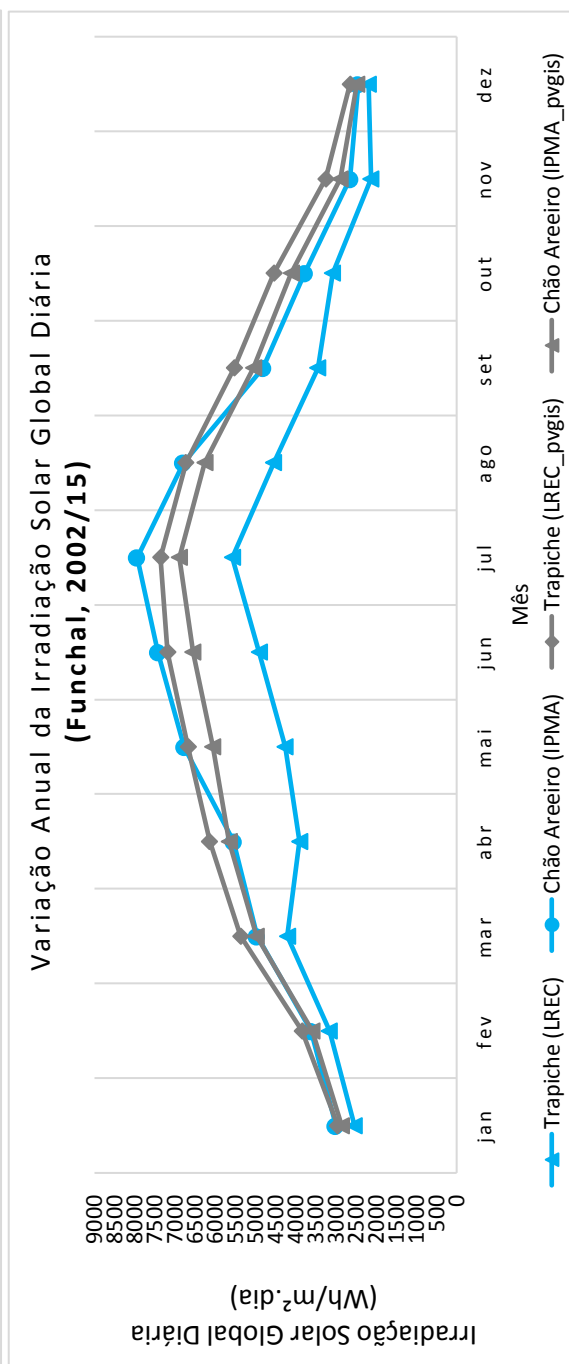
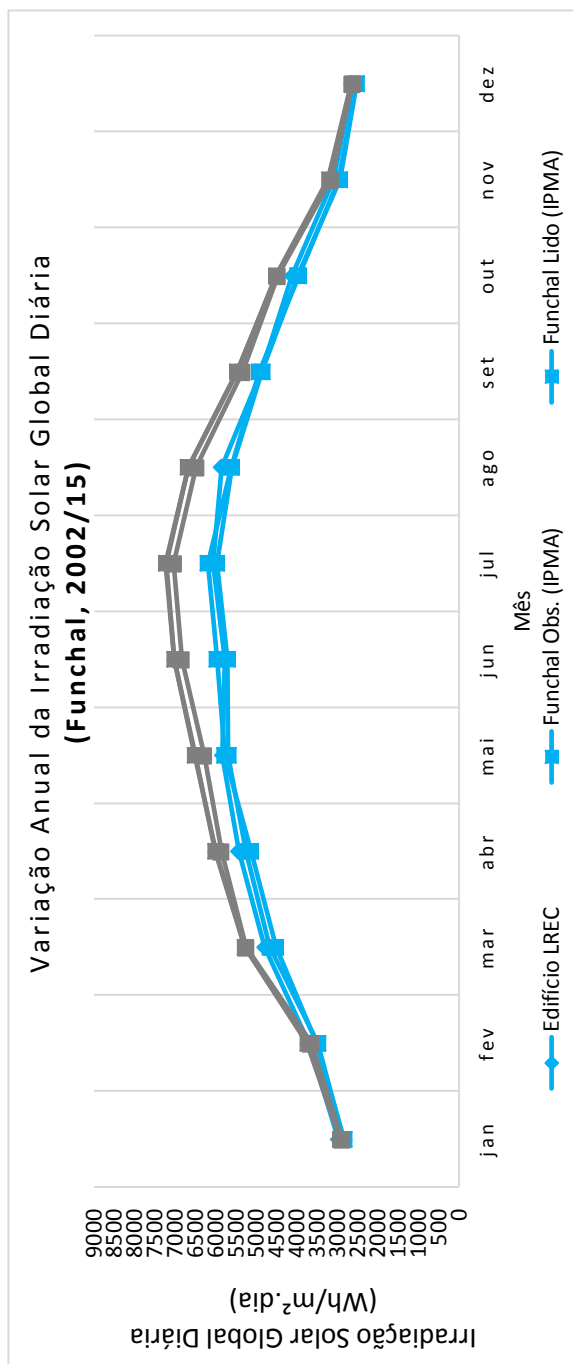
Anexo A.4 - ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS REGISTOS DAS EMAS E A BASE DE DADOS DO PVGIS

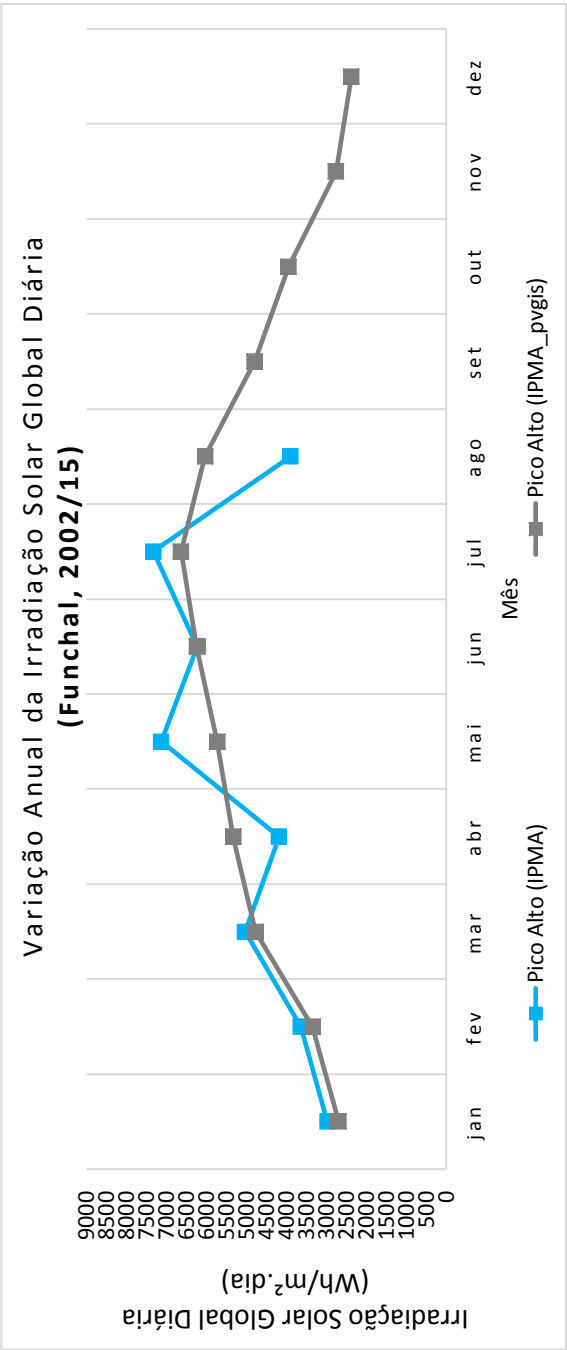
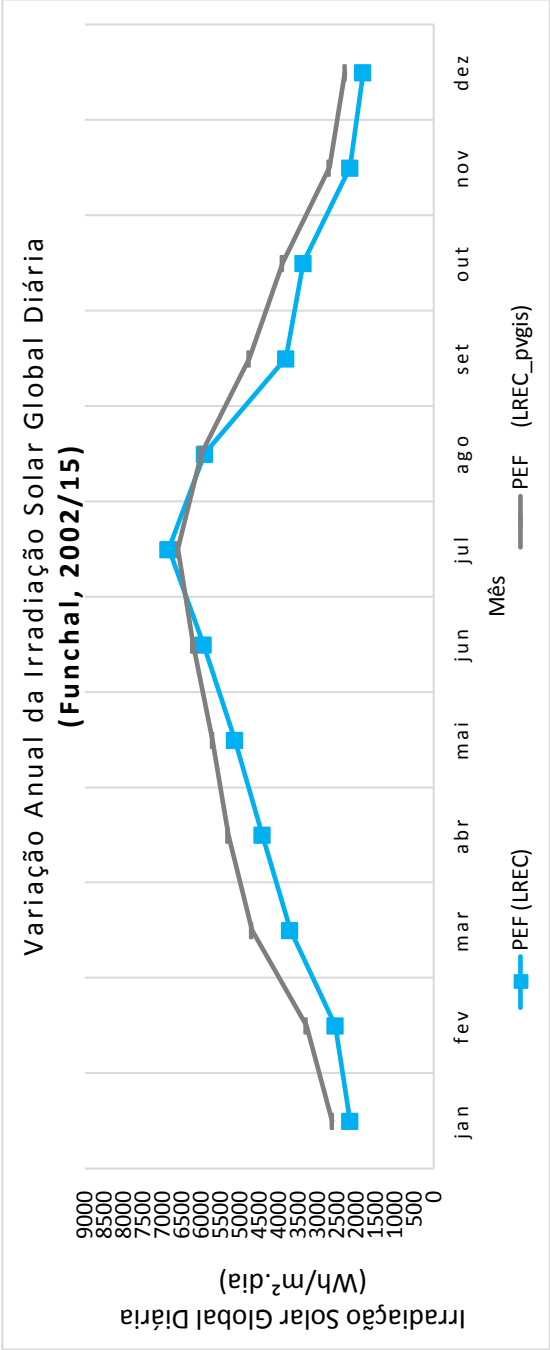
Anexo A.4.1 - Variação anual da ISGD indicado pelo PVGIS para as estações do concelho do Funchal (2005/15)

	Edifício LREC (_pvgis)	PEF (LREC_pvgis)	Trapiche (LREC_pvgis)	Funchal Obs. (IPMA_pvgis)	Funchal Lido (IPM_pvgis)	Chão Areeiro (IPMA_pvgis)	Pico Alto (IPMA_pvgis)
	alt. 258m	alt. 1300m	alt. 580m	alt. 58m	alt. 25m	alt. 1590m	alt. 1118
jan	2940	2620	2960	2880	2920	2860	2690
fev	3750	3290	3840	3650	3730	3590	3340
mar	5290	4690	5370	5250	5280	4980	4770
abr	6000	5300	6140	5860	6010	5650	5330
mai	6520	5710	6670	6290	6510	6060	5730
jun	7030	6210	7180	6840	7020	6550	6240
jul	7240	6600	7360	7040	7220	6890	6630
ago	6680	6000	6730	6480	6680	6260	6030
set	5460	4760	5530	5340	5470	5050	4790
out	4520	3900	4540	4470	4500	4110	3940
nov	3230	2690	3250	3160	3190	2890	2760
dez	2660	2290	2650	2630	2630	2480	2370
Média	5120	4510	5190	5000	5100	4790	4560

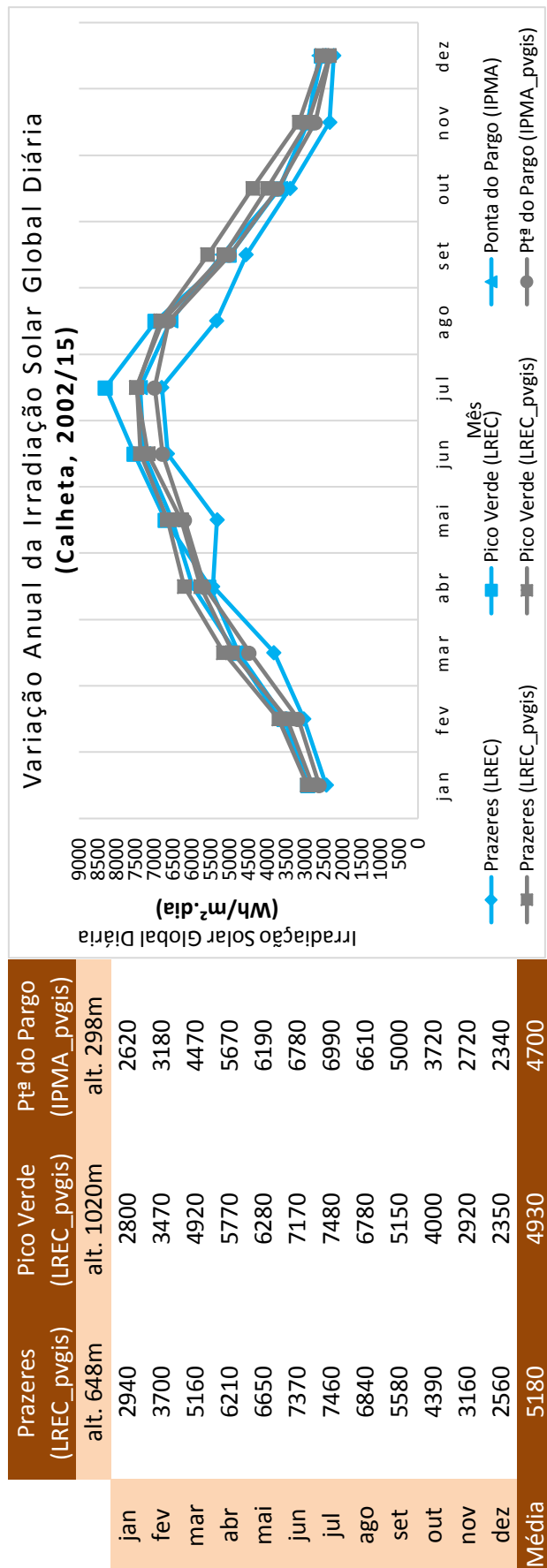
Desvio entre a ISGD das EMAs e a ISGD do PVGIS para as estações do concelho do Funchal (2005/15)

ΔISGD	Edifício LREC	PEF (LREC)	Trapiche (LREC)	Funchal Obs. (IPMA)	Funchal Lido (IPMA)	Chão Areeiro (IPMA)	Pico Alto (IPMA)	PEF (LREC) 2
jan	37	-468	-416	-25	-86	143	286	-2620
fev	-40	-753	-680	-164	-212	23	300	-3290
mar	-495	-990	-1161	-579	-760	-21	262	-4690
abr	-569	-880	-2239	-606	-875	-104	-1144	-5300
mai	-681	-578	-2408	-595	-729	706	1400	-5710
jun	-1255	-272	-2276	-1133	-1048	872	-13	-6210
jul	-1172	236	-1784	-1069	-1027	1047	698	-6600
ago	-822	-92	-2179	-872	-1059	530	-2139	-6000
set	-575	-954	-2078	-483	-541	-239	-4790	-4760
out	-404	-543	-1460	-490	-548	-331	-3940	-3900
nov	-139	-535	-1124	-222	-227	-246	-2760	-2690
dez	-26	-473	-460	-105	-92	-35	-2370	-2290
Média	-522	-530	-1527	-538	-604	186	491	-4510

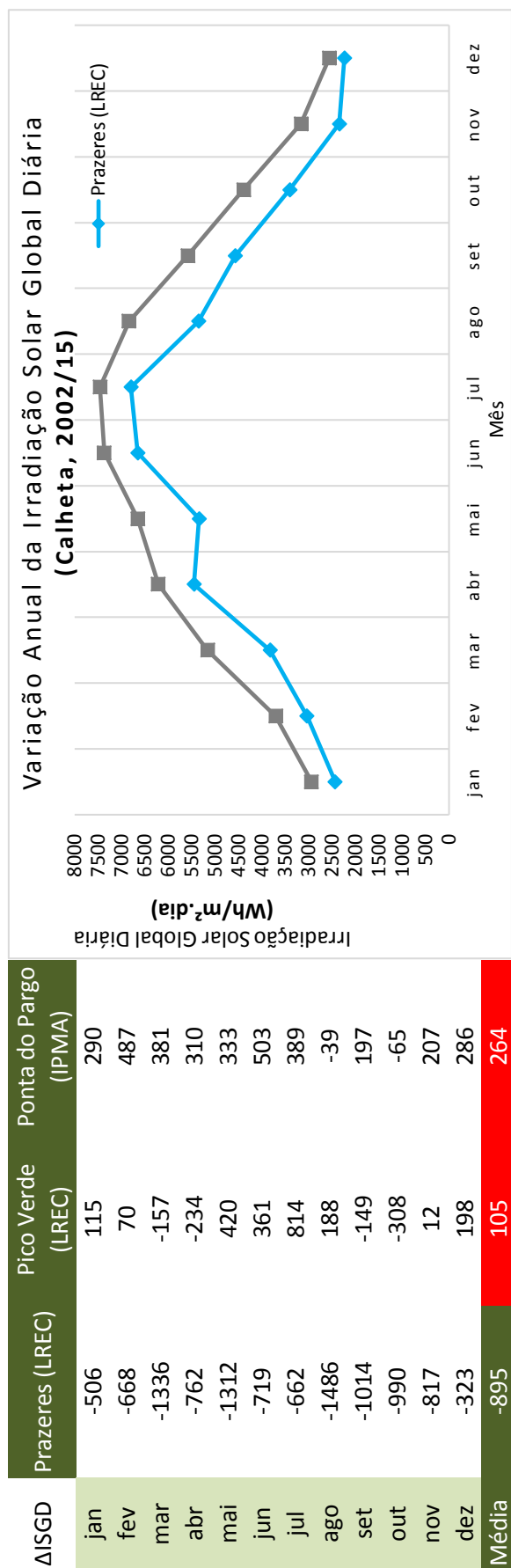


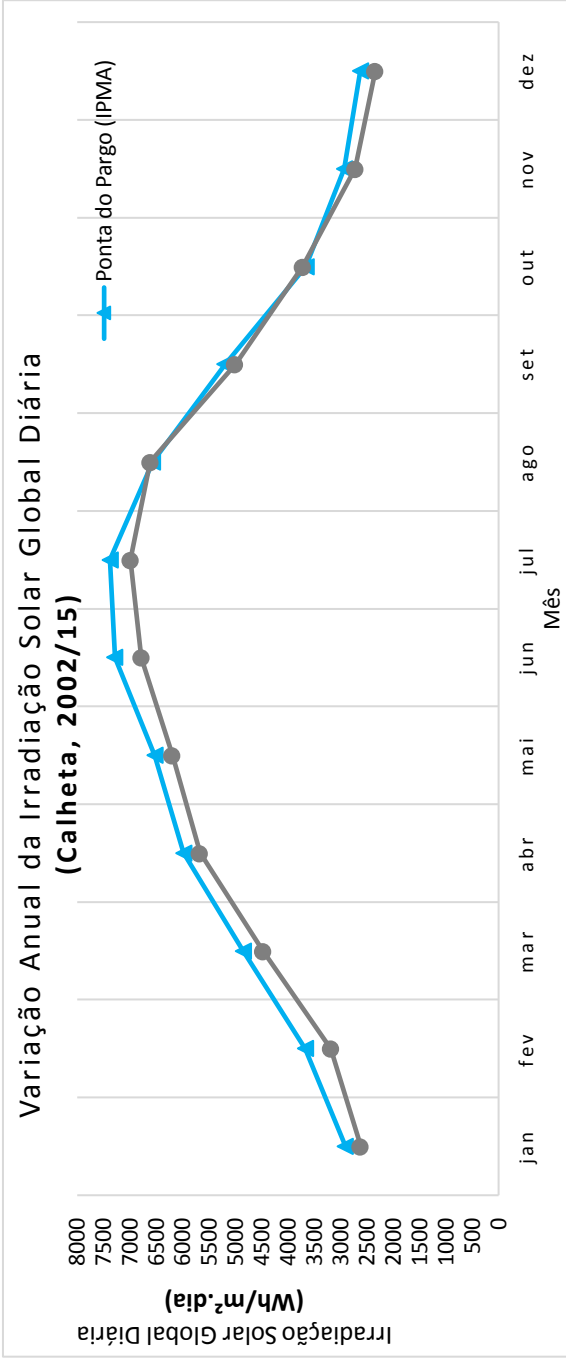
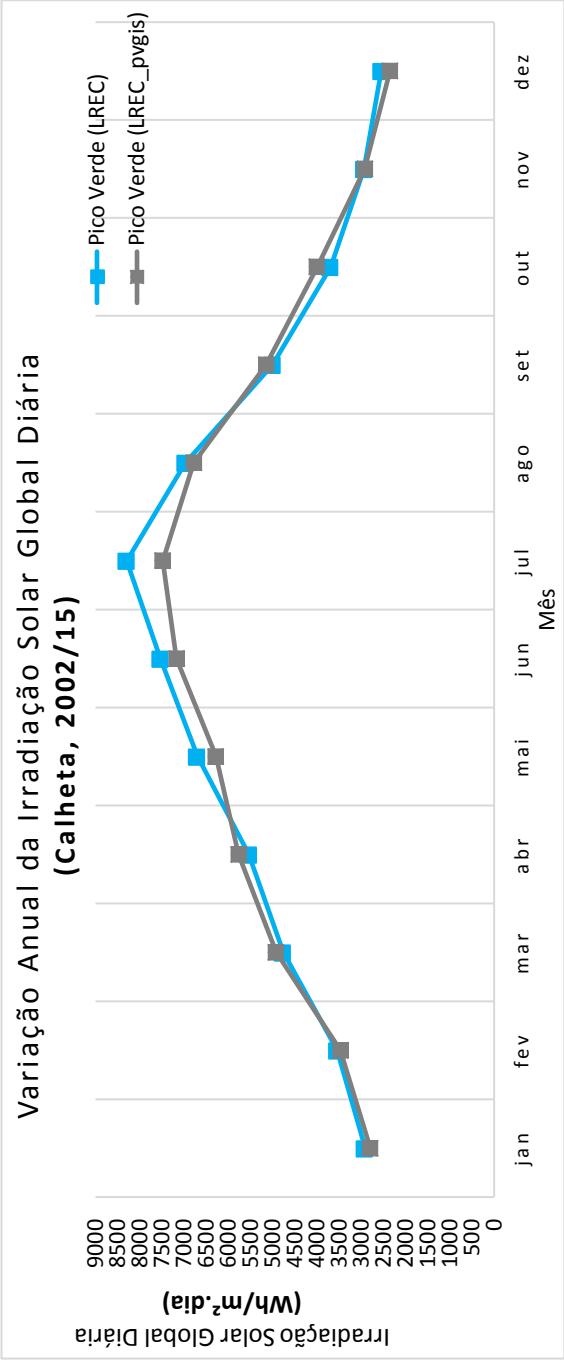


Anexo A.4.2 -Variação anual da ISGD indicado pelo PVGIS para as estações do concelho da Calheta (2002/15)

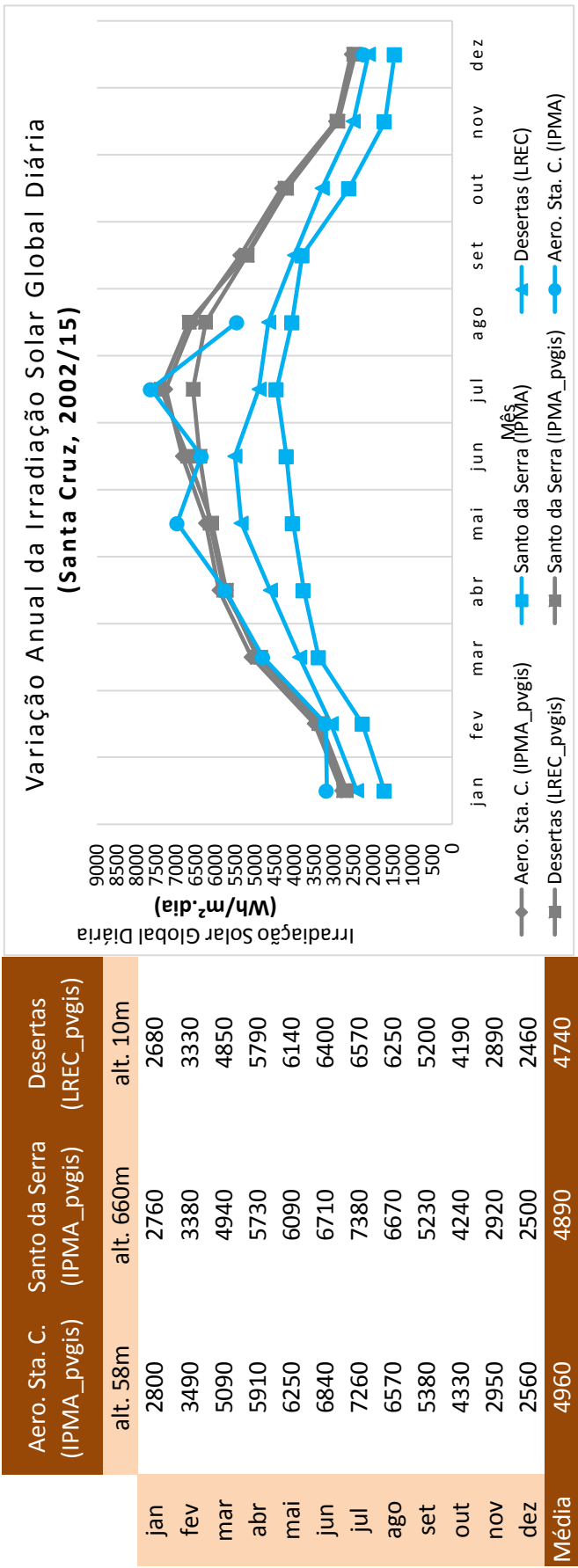


Desvio entre a ISGD das EMAs e a ISGD do PVGIS para as estações do concelho da Calheta (2002/15)

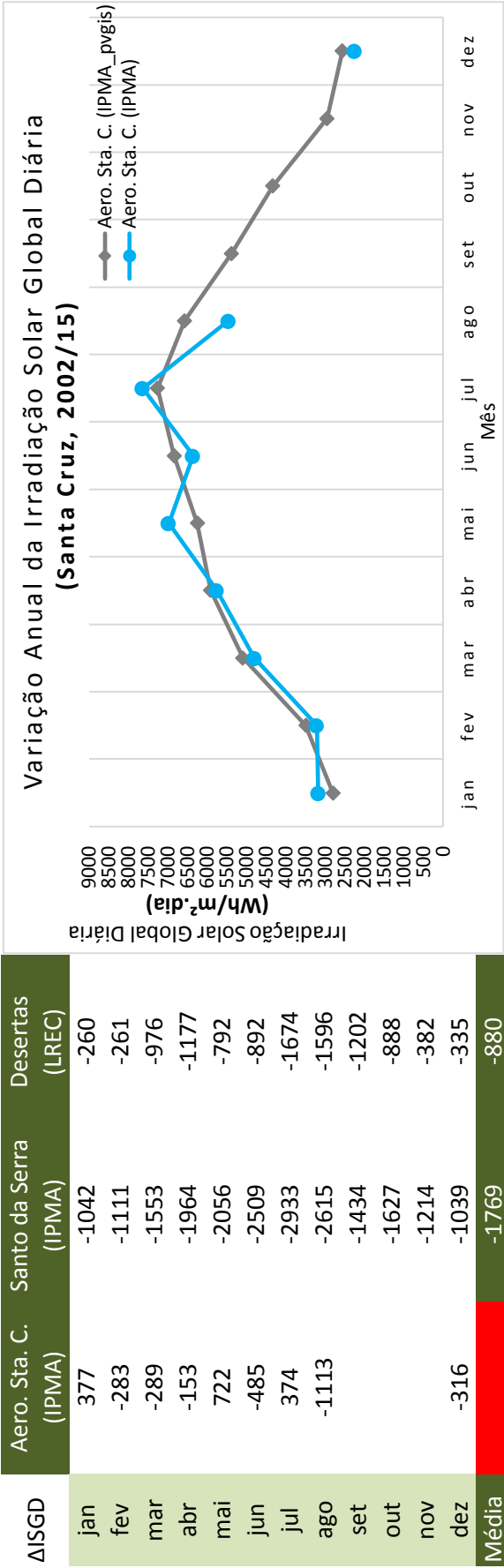


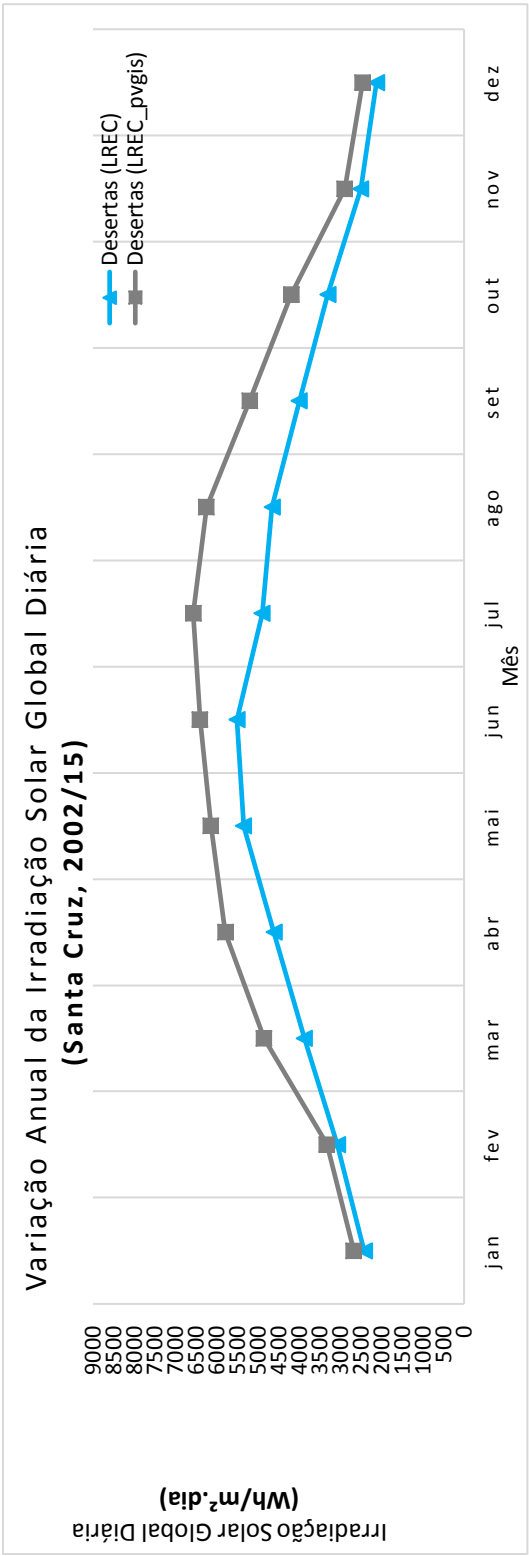
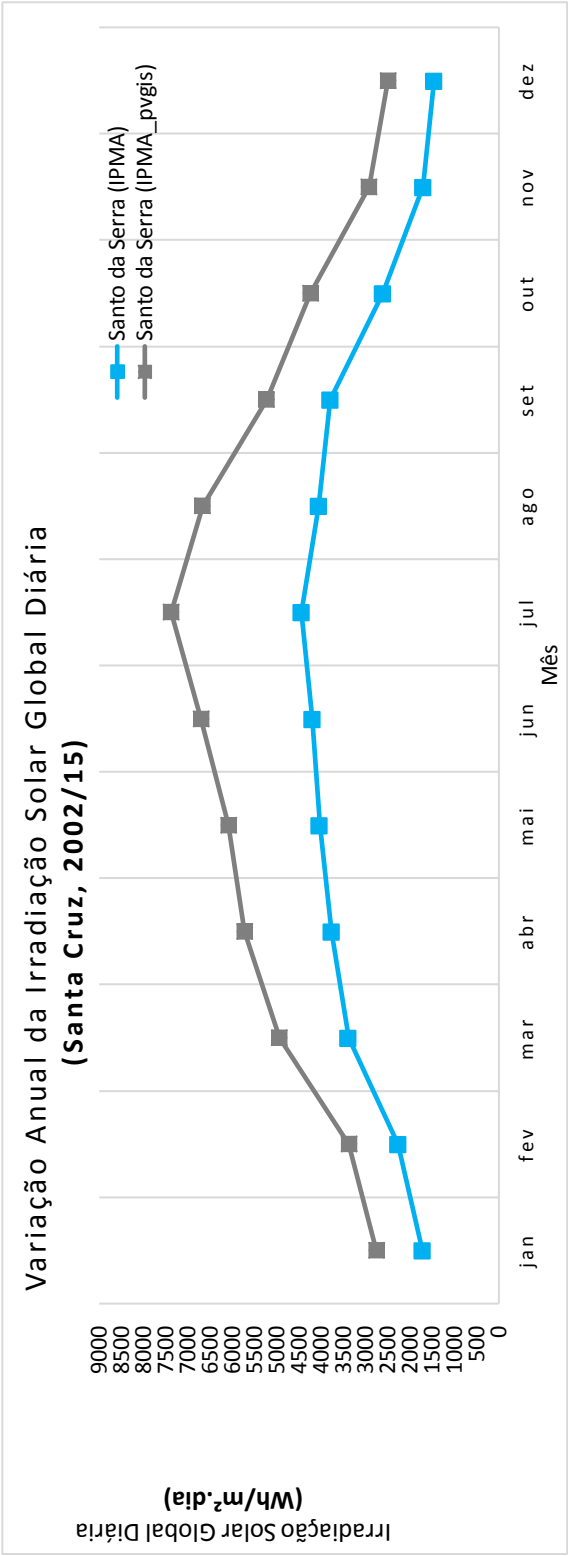


Anexo A.4.3 - Variação anual da ISGD indicado pelo PVGIS para as estações do concelho da Santa Cruz (2002/15)

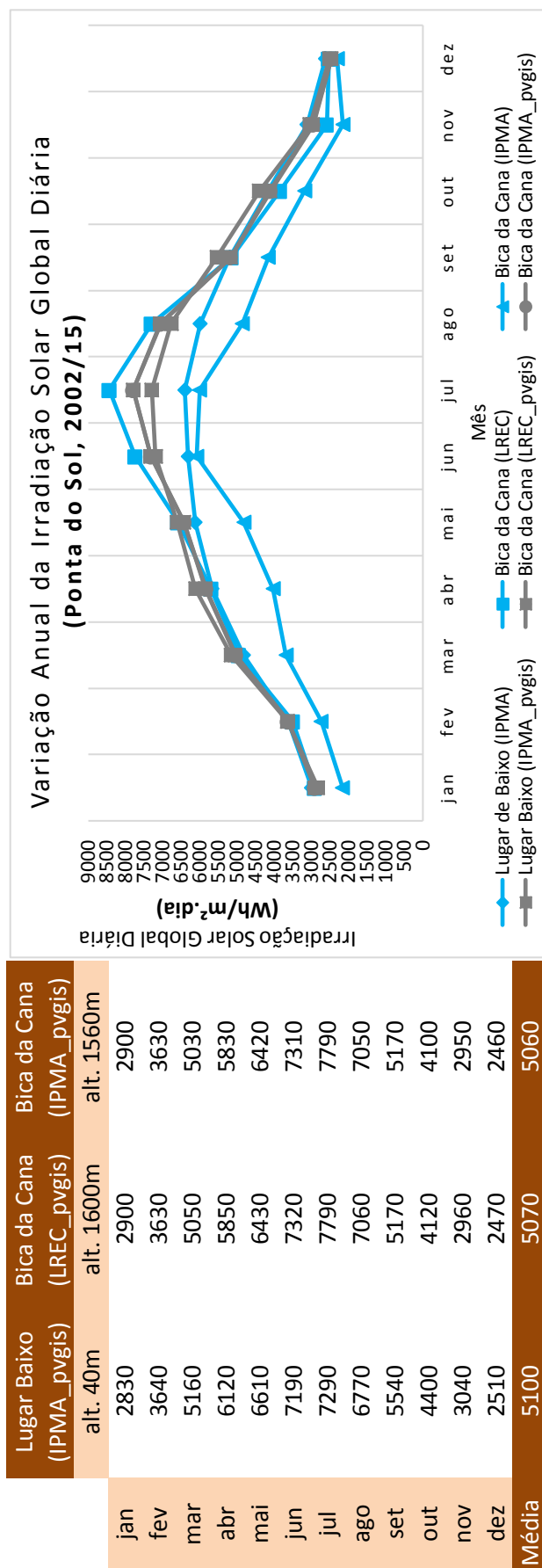


Desvio entre a ISGD das EMAs e a ISGD do PVGIS para as estações do concelho da Santa Cruz (2002/15)

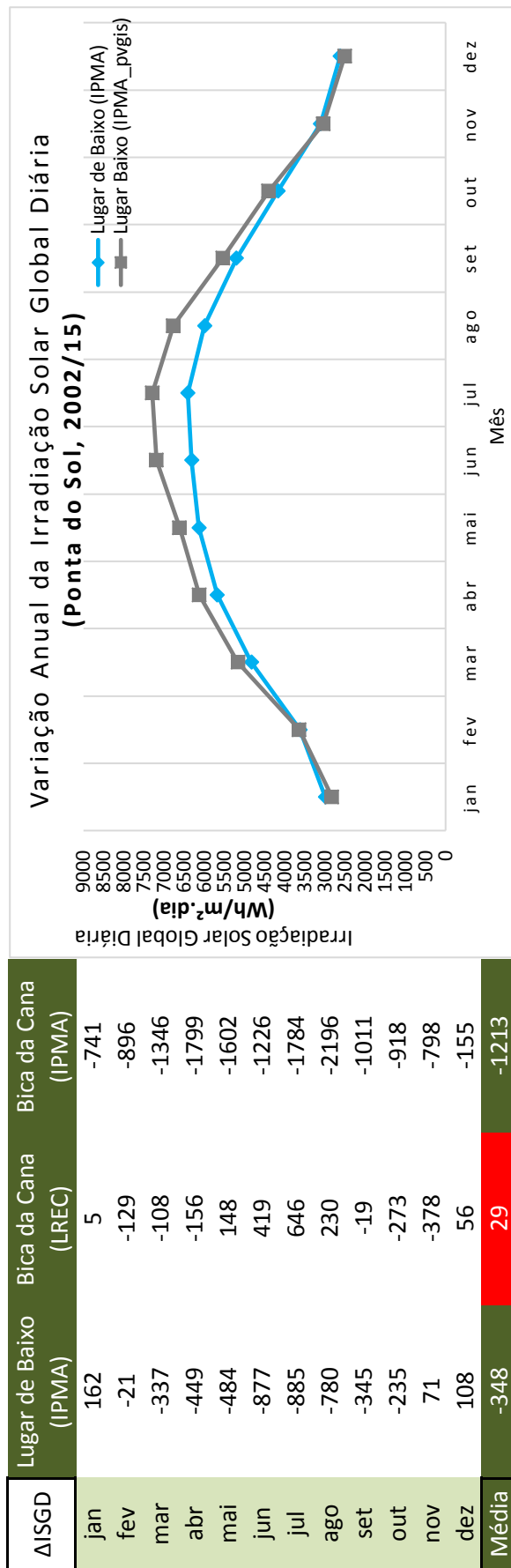


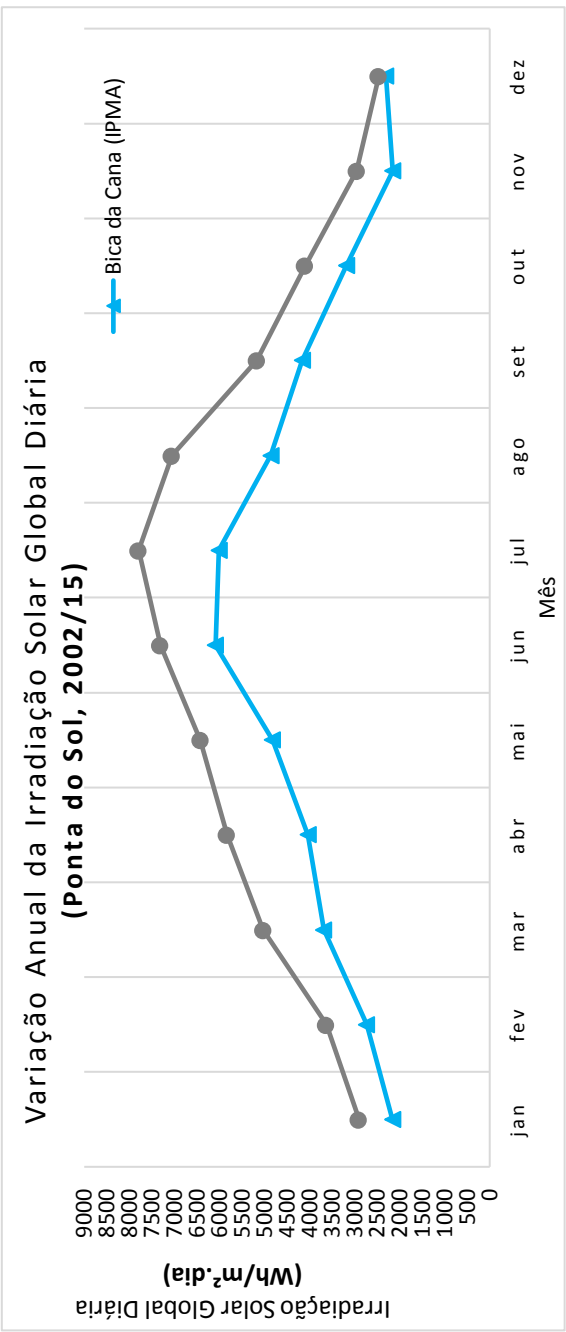
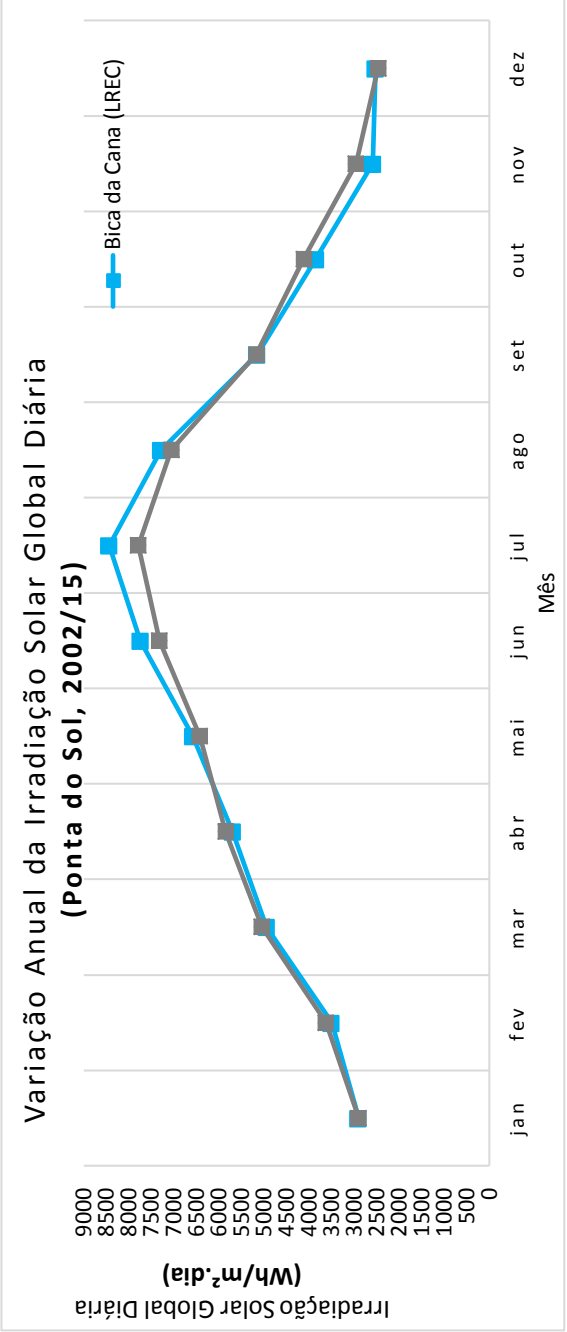


Anexo A.4.4 - Variação anual da ISGD indicado pelo PVGIS para as estações do conselho da Ponta do Sol (2002/15)



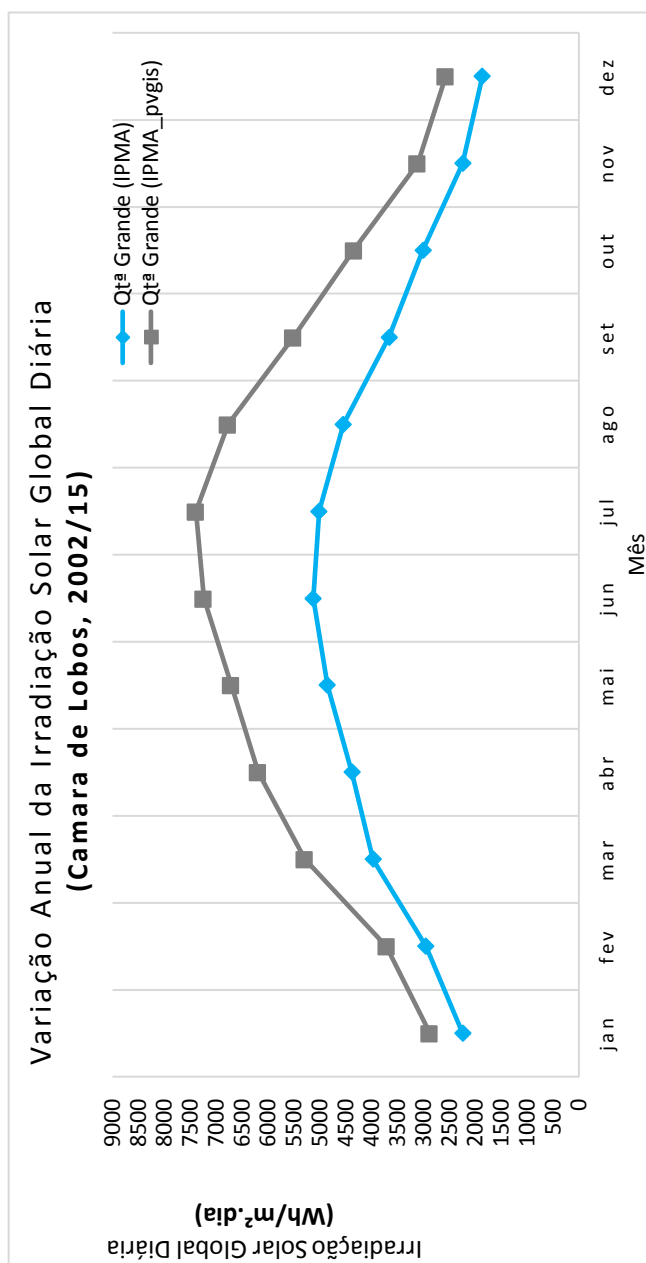
Desvio entre a ISGD das EMAs e a ISGD do PVGIS para as estações do concelho da Ponta do Sol (2002/15)



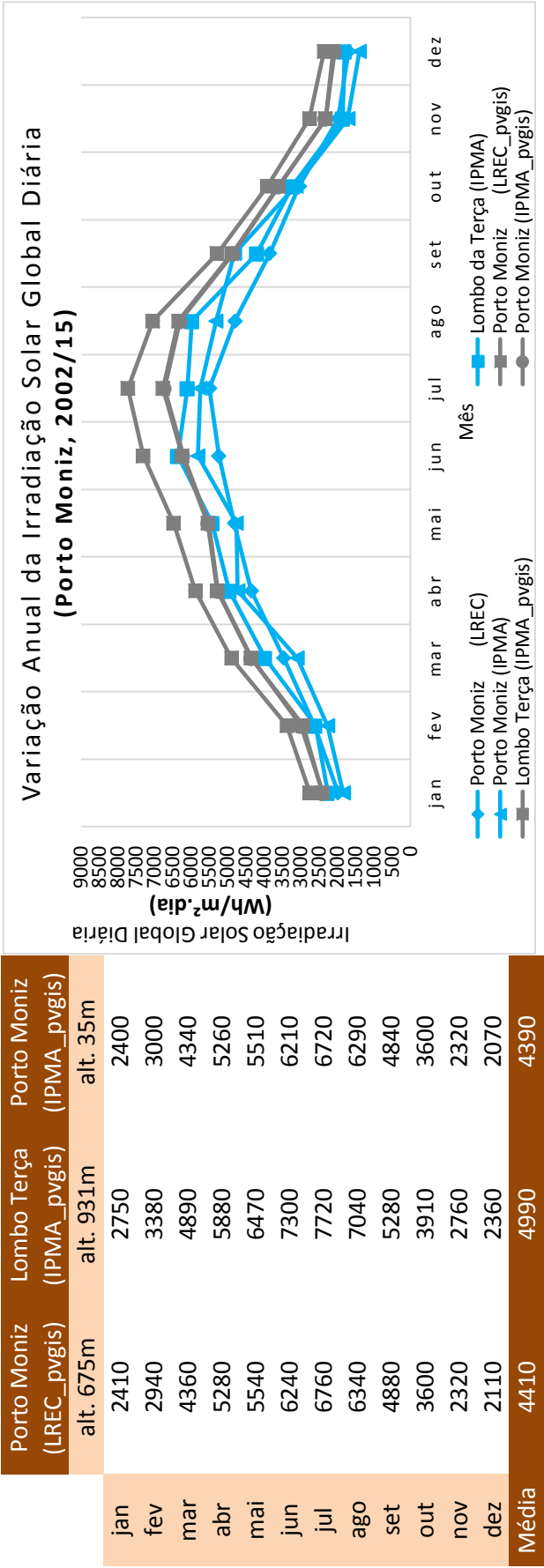


Anexo A.4.5 - Variação anual da ISGD indicado pelo PVGIS para as estações do concelho de Camara de Lobos (2002/15)

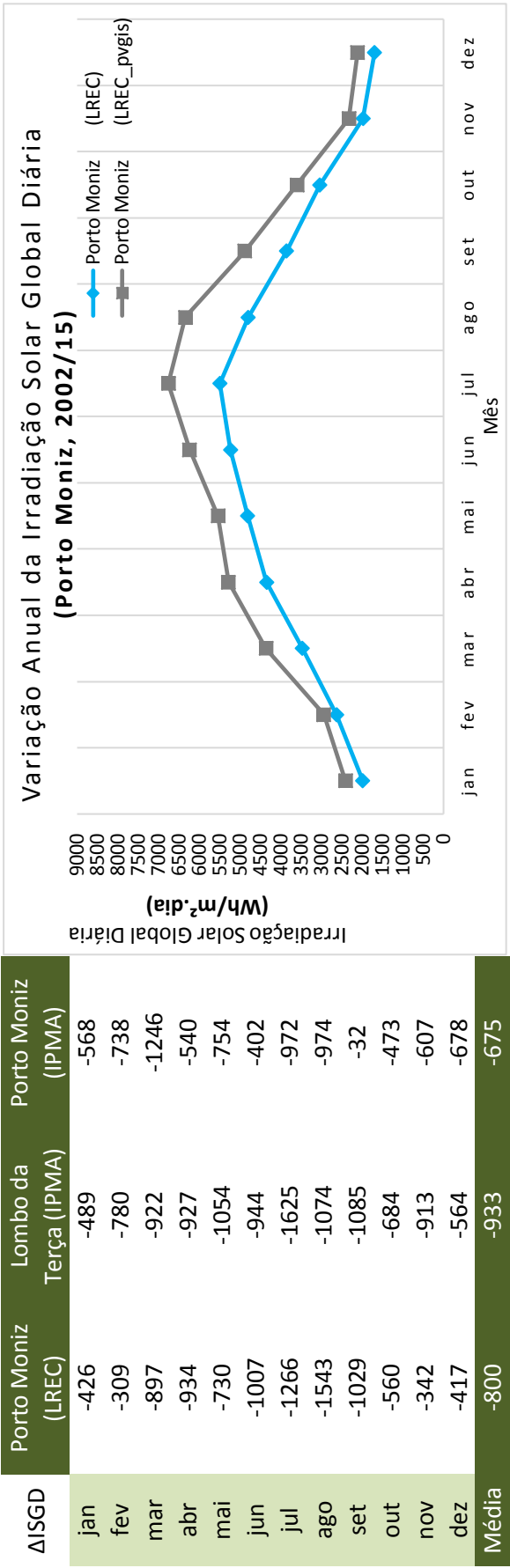
Qtª Grande (IPMA_pvgis)		Δ ISGD
alt. 580m	alt. 580m	
jan	2880	-641
fev	3710	-760
mar	5290	-1319
abr	6190	-1812
mai	6710	-1855
jun	7240	-2115
jul	7390	-2377
ago	6770	-2225
set	5510	-1849
out	4340	-1334
nov	3110	-867
dez	2570	-707
Média	5150	-1496

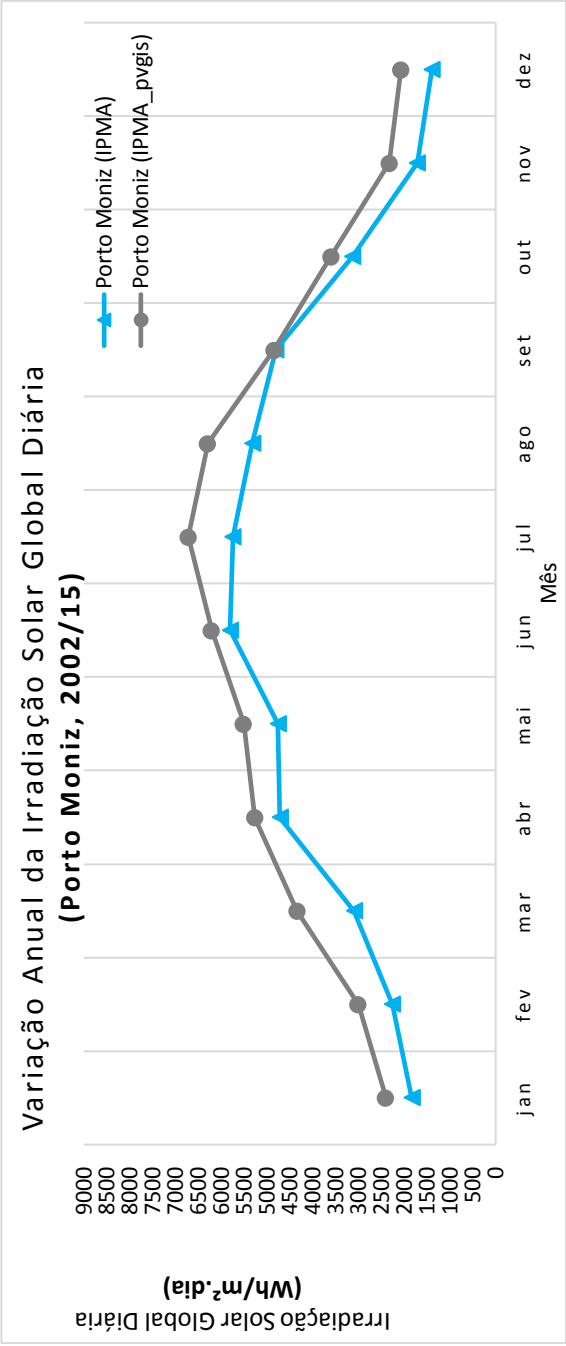
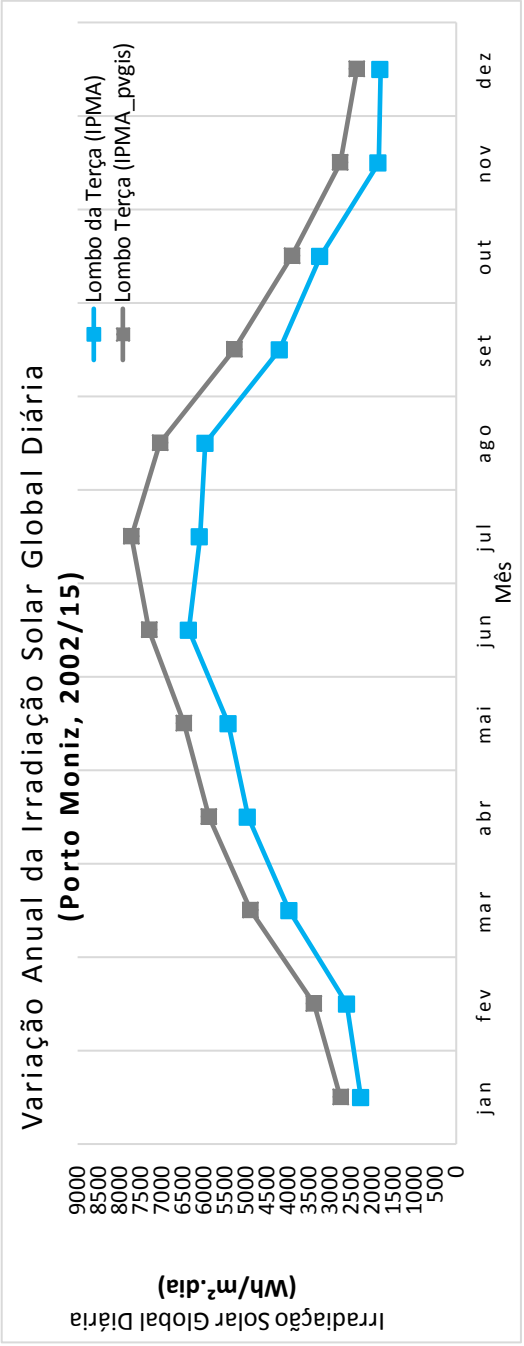


Anexo A.4.6 - Variação anual da ISGD indicado pelo PVGIS para as estações do concelho do Porto Moniz (2002/15)

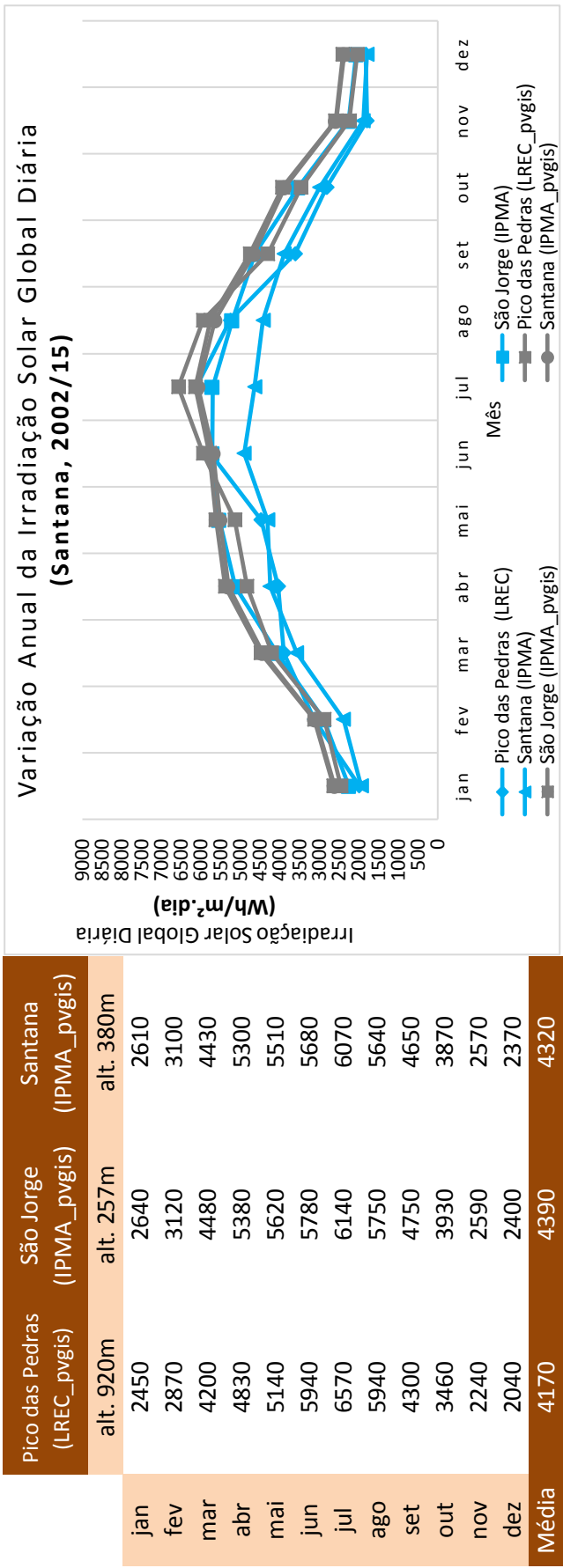


Desvio entre a ISGD das EMAs e a ISGD do PVGIS para as estações do concelho do Porto Moniz (2002/15)

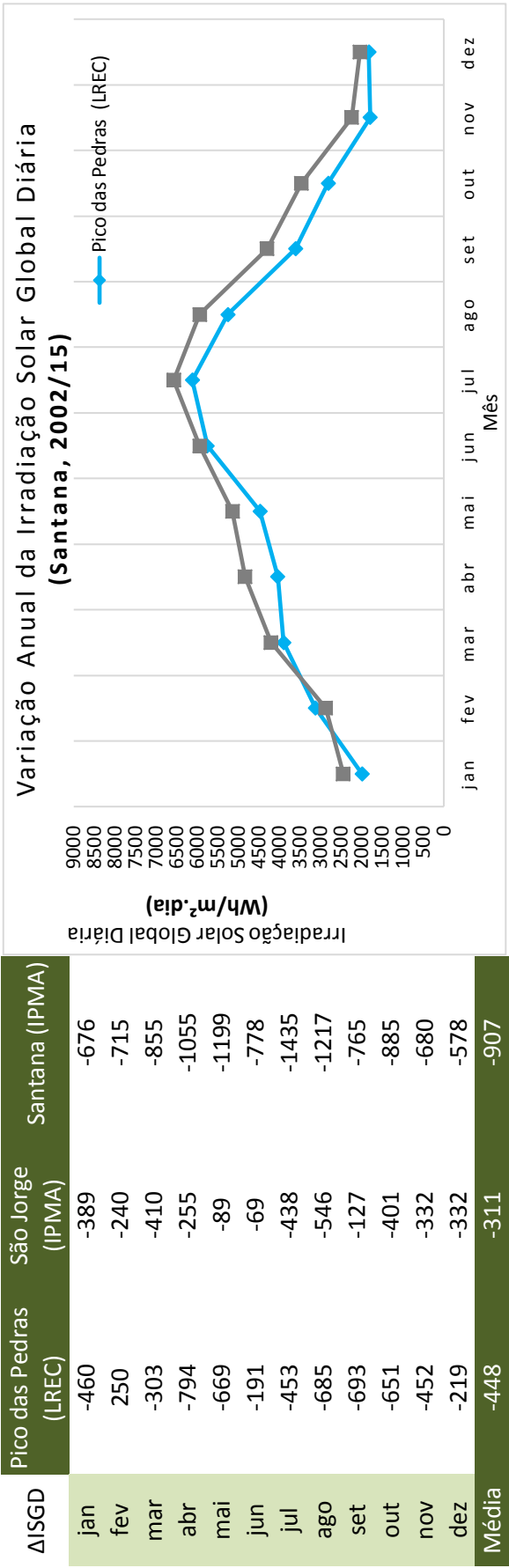


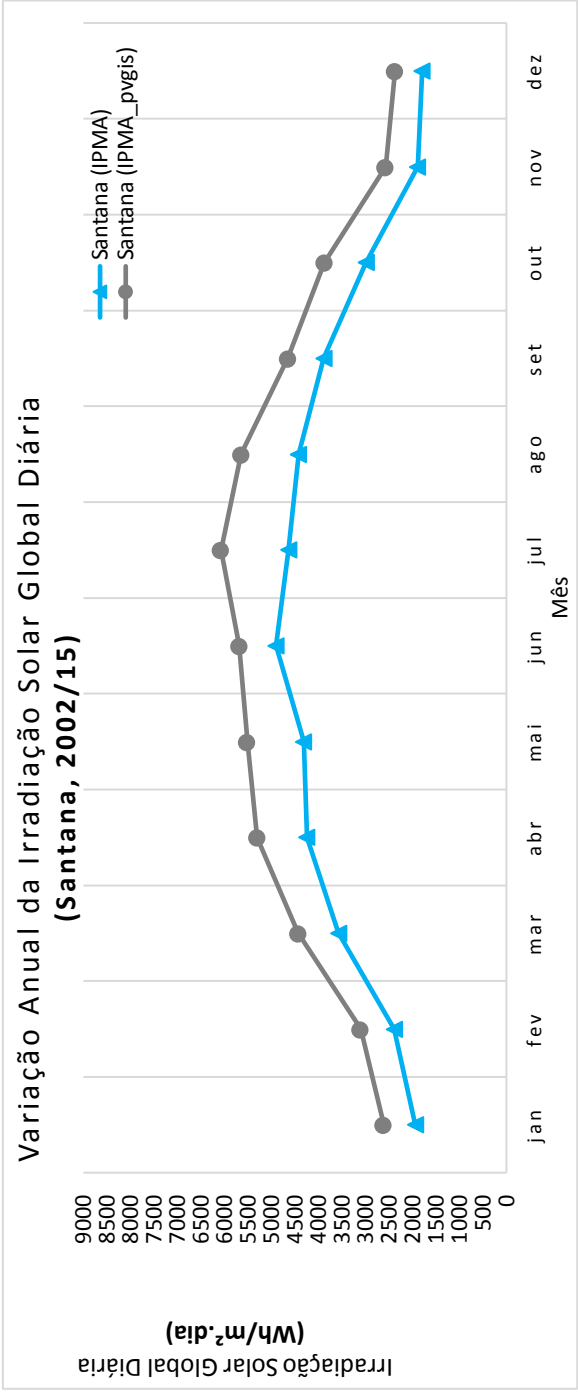
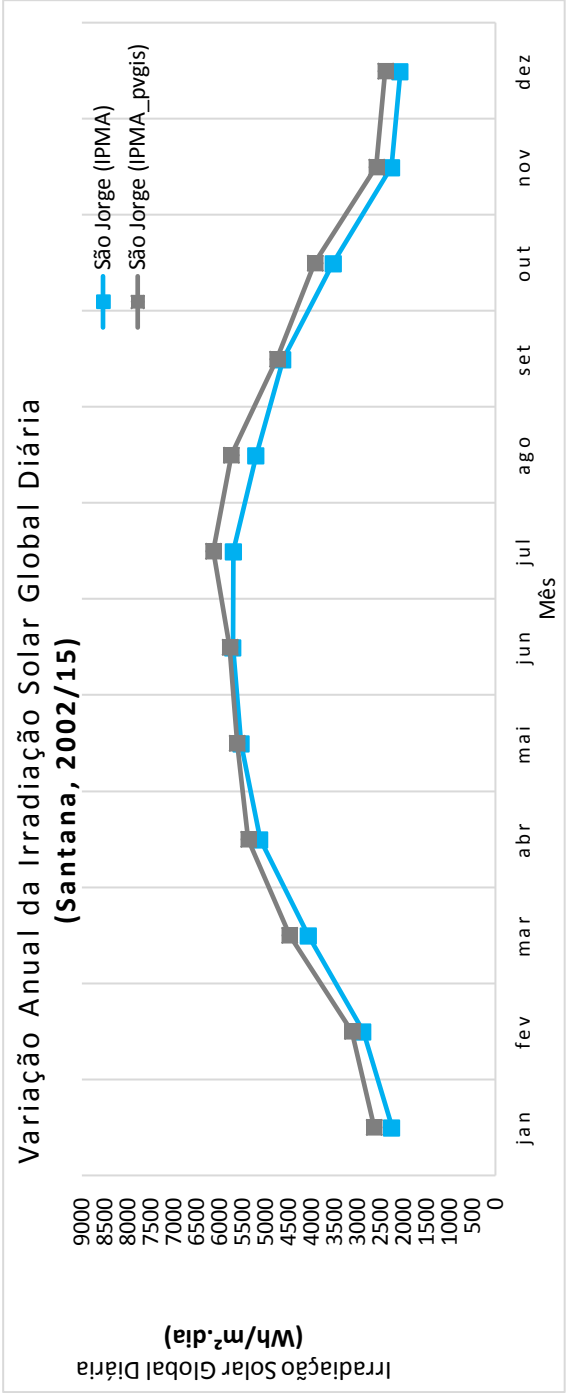


Anexo A.4.7 - Variação anual da ISGD indicado pelo PVGIS para as estações do concelho de Santana (2002/15)



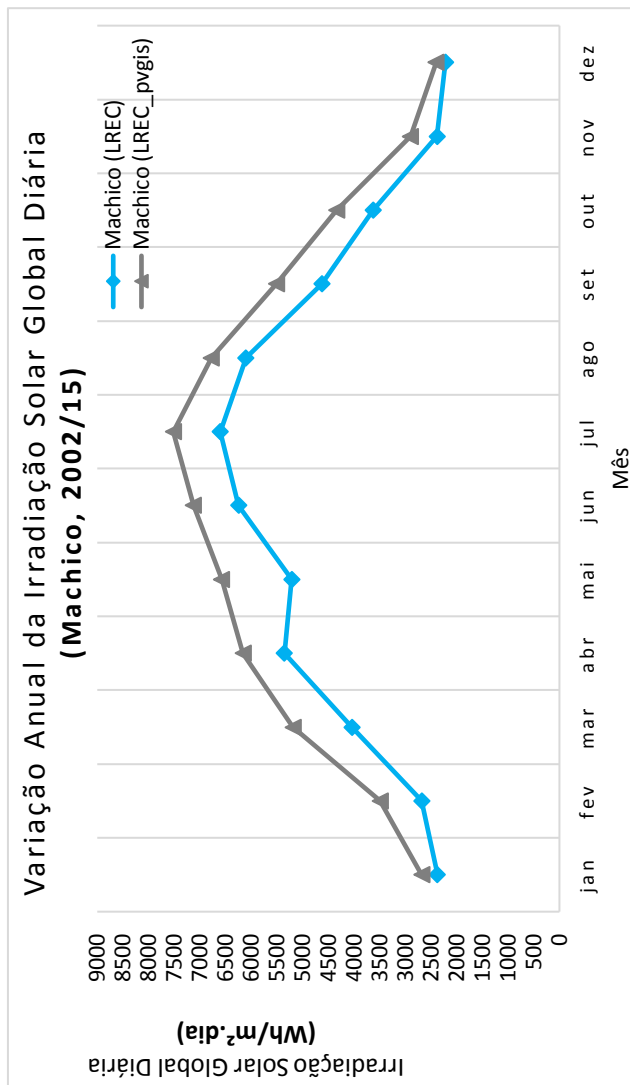
Desvio entre a ISGD das EMAs e a ISGD do PVGIS para as estações do concelho de Santana (2002/15)





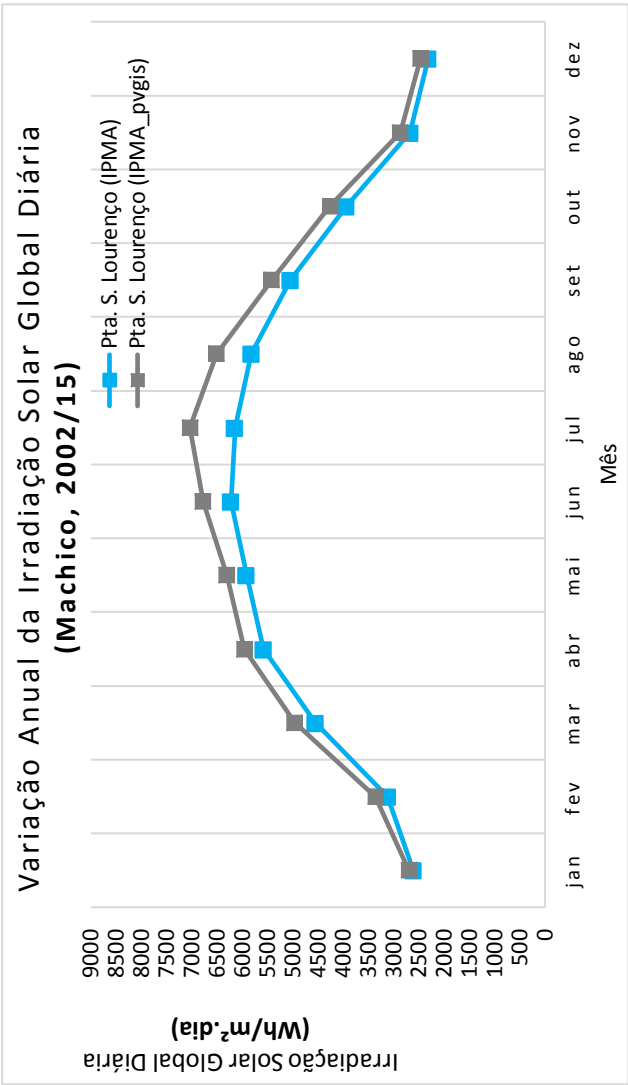
Anexo A.4.8 - Variação anual da ISGD indicado pelo PVGIS para as estações do concelho de Machico (2002/15)

	Machico (LREC_pvgis)	Pta. S. Lourenço (IPMA_pvgis)
	alt. 170m	alt. 133m
jan	2680	2700
fev	3490	3360
mar	5190	4960
abr	6160	5960
mai	6580	6310
jun	7130	6780
jul	7520	7040
ago	6780	6510
set	5510	5420
out	4340	4260
nov	2900	2870
dez	2400	2470
Média	5060	4900

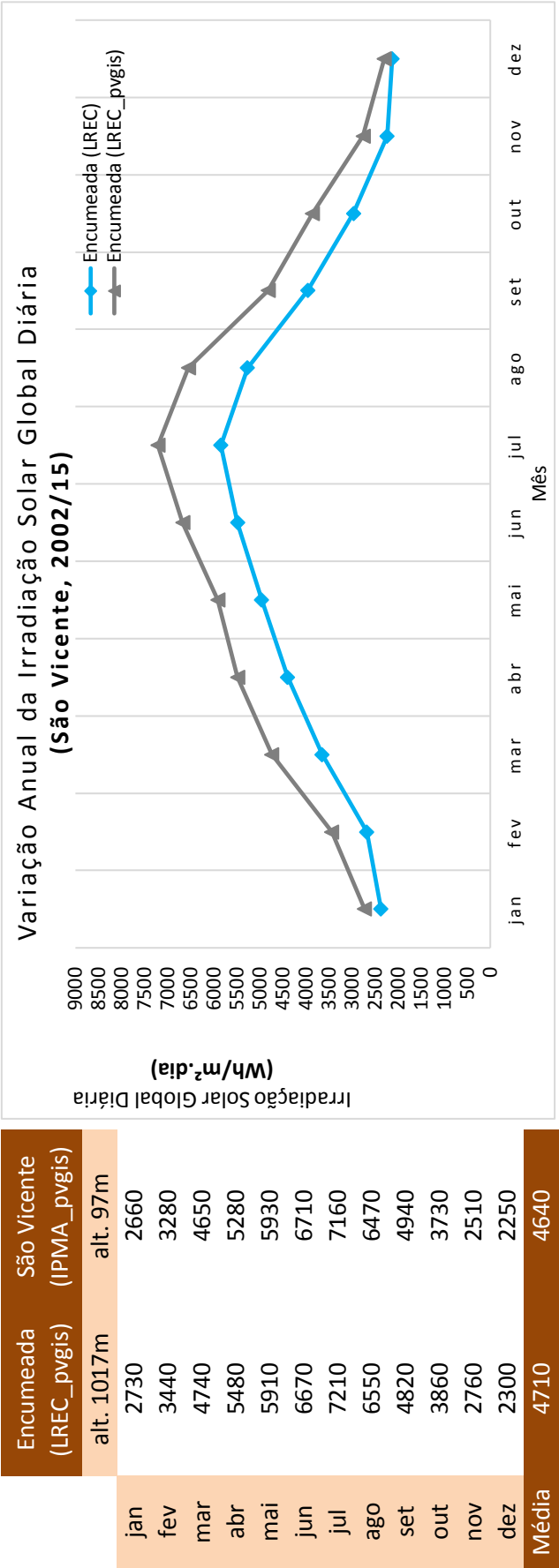


Desvio entre a ISGD das EMAs e a ISGD do PVGIS para as estações do concelho de Machico (2002/15)

ΔISGD	Machico (LREC)	Pta. S. Lourenço (IPMA)
jan	-306	-94
fev	-807	-241
mar	-1147	-411
abr	-804	-383
mai	-1368	-396
jun	-881	-557
jul	-916	-899
ago	-676	-693
set	-883	-376
out	-710	-324
nov	-519	-195
dez	-179	-155
Média	-770	-407

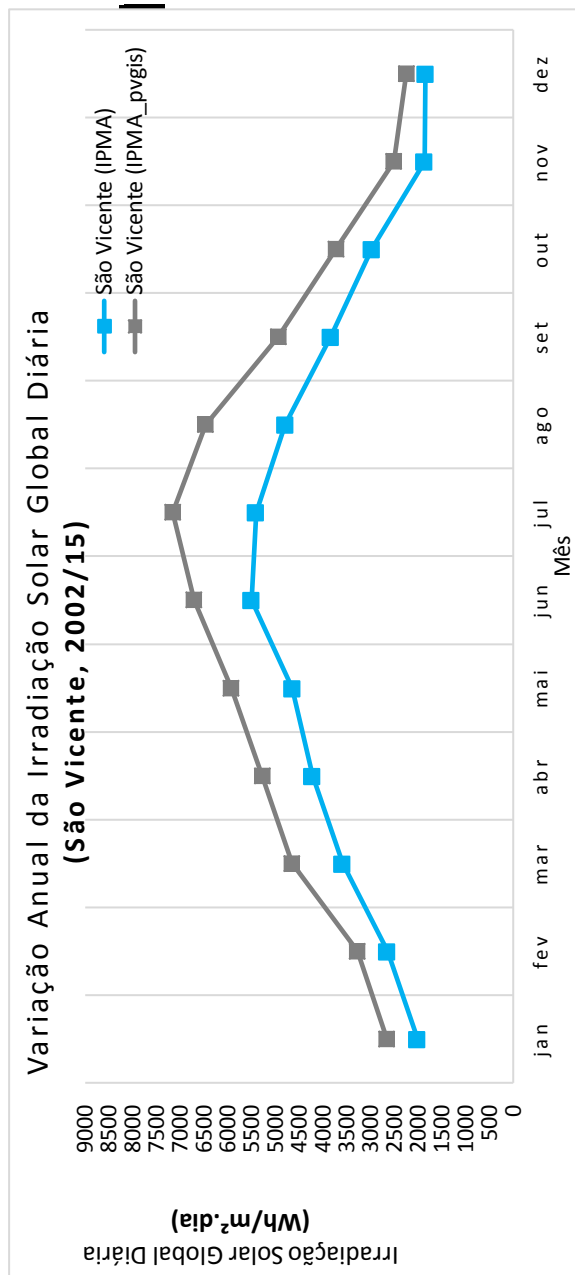


Anexo A.4.9 - Variação anual da ISGD indicado pelo PVGIS para as estações do concelho de São Vicente (2002/15)



Desvio entre a ISGD das EMAs e a ISGD do PVGIS para as estações do concelho de São Vicente (2002/15)

Δ ISGD	Encumeada (LREC)	São Vicente (IPMA)
jan	-357	-644
fev	-763	-634
mar	-1093	-1058
abr	-1083	-1061
mai	-949	-1282
jun	-1187	-1209
jul	-1366	-1751
ago	-1283	-1676
set	-856	-1100
out	-894	-753
nov	-520	-647
dez	-172	-403
Média	-881	-1027



Anexo A.4.10 - Desvio entre a média anual da ISGD das EMAs e a indicada pela base de dados do PVGIS para o local

Rede de EMAs LREC					
Nome da EMA (Rede LREC)	Localização (concelho)	Altitude/Cota (m)	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m².dia)	Média Anual da ISGD "PVGIS" (Wh/m².dia)	ΔISGD (Wh/m².dia)
Edifício LREC	Funchal	250	4598	5120	-522
Trapiche		590	3663	5190	-1527
P.E. Funchal		1300	3980	4510	-530
P.E. Funchal 2		1300	4506	4510	-4
Bica da Cana	Ponta do Sol	1600	5099	5070	29
Deserta Grande	Santa Cruz	10	3860	4740	-880
Encumeada	São Vicente	1017	3829	4710	-881
Machico	Machico	170	4290	5060	-770
Pico das Pedras	Santana	920	3722	4170	-448
Porto Moniz	Porto Moniz	675	3610	4410	-800
Prazeres	Calheta	648	4285	5180	-895
Pico Verde		1020	5035	4930	105

Continuação...Anexo A.4.10 - Desvio entre a média anual da ISGD das EMAs e a indicada pela base de dados do PVGIS para o local

Rede de EMAs IPMA					
Nome da EMA (Rede LREC)	Localização (concelho)	Altitude/Cota (m)	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m².dia)	Média Anual da ISGD "PVGIS" (Wh/m².dia)	ΔISGD (Wh/m².dia)
Observatório	Funchal	58	4462	5000	-538
Lido		25	4496	5100	-604
Pico Alto		1112		4560	
Chão Areeiro		1590	4976	4790	186
Lugar de Baixo	Ponta do Sol	42	4752	5100	-348
Bica da Cana		1580	3847	5060	-1213
Quinta Grande	Camara de Lobos	458	3654	5150	-1496
Aero. Sta. Catarina	Santa Cruz	58		4960	
Santo da Serra		690	3121	4890	-1769
Pta. São Lourenço	Machico	133	4493	4900	-407
Ponta do Pargo	Calheta	278	4964	4700	264
Porto Moniz		35		4390	
Lombo da Terça	Porto Moniz	934	4057	4990	-933
São Vicente	São Vicente	110	3613	4640	-1027
São Jorge	Santana	258	4079	4390	-311
Santana		409	3413	4320	-907
Aero. Porto Santo	Porto Santo	78	4895	5230	-335

Anexo A.4.11 - Caracterização dos desvios apresentados

EMAs que apresentaram uma média anual menor que a do PVGIS, com um desvio superior a 1000 Wh/m².dia

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m².dia)	Média Anual da ISGD "PVGIS" (Wh/m².dia)	ΔISGD (Wh/m².dia)
São Vicente	IPMA	SP Lite 2	5	0,0%	< a 2% ao ano	3613	4640	-1027
Trapiche	LREC	SP Lite	4	35,5%	< a 2% ao ano	3663	5190	-1527
Bica da Cana	IPMA	EP08	6	0,0%	< a 2% ao ano	3847	5060	-1213
Quinta Grande	IPMA	EP08	5	0,0%	< a 2% ao ano	3654	5150	-1496
Santo da Serra	IPMA	EP08	5	2,8%	< a 2% ao ano	3121	4890	-1769

EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD maior que a do PVGIS, com um desvio inferior a 300 Wh/m².dia

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m².dia)	Média Anual da ISGD "PVGIS" (Wh/m².dia)	ΔISGD (Wh/m².dia)
Bica da Cana	LREC	SP Lite	10	9,1%	< a 2% ao ano	5099	5070	29
Pico Verde	LREC	SP Lite	10	10,2%	< a 2% ao ano	4285	5180	105
Ponta do Pargo	IPMA	CM11	9	3,9%	< a 5%	4964	4700	264
Chão Areiro	IPMA	CM12	12	9,4%	< a 5%	4976	4790	186

EMAs que apresentaram uma média anual da ISGD menor que a do PVGIS, com um desvio inferior a 1000 Wh/m².dia

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m².dia)	Média Anual da ISGD "PVGIS" (Wh/m².dia)	ΔISGD (Wh/m².dia)
Santana	IPMA	SP Lite 2	5	0,0%	< a 2% ao ano	3413	4320	-907
Desertas	LREC	SP Lite	10	1,3%		3860	4740	-880
Machico			7	11,5%		4290	5060	-770
Pico das Pedras			6	15,7%		3722	4170	-448
P.E.Funchal			9	20,9%		3980	4510	-530
P.E.Funchal 2			5	1,6%		4506	4510	-4
Porto Moniz			10	22,4%		3610	4410	-800
Prazeres			5	42,7%		4285	5180	-895
Pta. São Lourenço	IPMA	CM 11	6	1,2%	< a 5% ao fim destes anos de funcionamento	4493	4900	-407
Lugar de Baixo			13	6,9%		4752	5100	-348
São Jorge			14	7,6%		4079	4390	-311
Aero. Porto Santo			12	8,2%		4895	5230	-335
Lombo da Terça			6	9,5%	Recalibrado	4057	4990	-933
Observatório			13	9,6%		4462	5000	-538
Lido	IPMA	EP08	12	6,4%	< a 2% ao ano	4496	5100	-604
LREC	LREC	CM3	10	3,4%		4598	5120	-522
Encumeada			10	5,4%		3829	4710	-881

Anexo A.5 - ESTUDO COMPARATIVO RELATIVAMENTE AO ATLAS DA RADIAÇÃO SOLAR

Anexo A.5.1 - Registos da ISGD utilizados na elaboração do Atlas da Radiação Solar do Arquipélago da Madeira

2002/05	Areiro	Funchal	Lugar de Baixo	Ponta do Pargo	São Jorge	Porto Santo
jan	3146	2846	2775	2754	2392	2734
fev	3194	3419	3474	3469	2982	3632
mar	4495	4643	4628	4428	4041	5019
abr	5130	4683	5044	5577	4893	6155
mai	6637	5691	6144	6765	5553	7306
jun	7470	5601	6136	7285	6175	7095
jul	8023	5614	6024	7232	5770	7075
ago	6402	5496	5960	6496	6016	6545
set	5232	5043	5217	5155	4891	5534
out	3790	3691	3879	3862	3617	4056
nov	2517	2865	2922	2753	2339	3123
dez	2305	2481	2568	2547	1972	2511
Média	4875	4345	4570	4868	4226	5072

Anexo A.5.2 - Desvio entre a média anual da ISGD das EMAs e a indicada pelo *Atlas da Radiação Solar* para o local

Rede de EMAs IPMA					
Nome da EMA (Rede LREC)	Localização (concelho)	Altitude/Cota (m)	Média Anual da ISGD da EMA (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD no "Atlas da Radiação Solar" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
Observatório	Funchal	58	4462	[4200;4400]	62
Lido		25	4496	[4400;4600]	96
Pico Alto		1112		[4600;4800]	
Chão Areeiro	Ponta do Sol	1590	4976	[4800;5000]	176
Lugar de Baixo		42	4752	[4400;4600]	152
Bica da Cana		1580	3847	[≥ 5000]	-1153
Quinta Grande		458	3654	[4400;4600]	-746
Aero. Sta. Catarina	Santa Cruz	58		[4400;4600]	
Santo da Serra		690	3121	[4200;4400]	-1079
Pta. São Lourenço	Machico	133	4493	[4600;4800]	-107
Ponta do Pargo	Calheta	278	4964	[4600;4800]	164
Porto Moniz	Porto Moniz	35		[4400;4600]	
Lombo da Terça		934	4057	[≤ 4200]	-143
São Vicente	São Vicente	110	3613	[4000;4200]	-387
São Jorge	Santana	258	4079	[4200;4400]	-121
Santana		409	3413	[4000;4200]	-587
Aero. Porto Santo	Porto Santo	78	4895	[≥ 5000]	-105

Rede de EMAs LREC					
Nome da EMA (Rede LREC)	Localização (concelho)	Altitude/Cota (m)	Média Anual da ISGD da EMA (Wh/m ² .dia)	Média Anual da ISGD no "Atlas da Radiação Solar" (Wh/m ² .dia)	ΔISGD (Wh/m ² .dia)
Edifício LREC	Funchal	250	4598	[4200;4400]	198
Trapiche		590	3663	[4400;4600]	-737
P.E. Funchal		1300	3980	[4600;4800]	-620
P.E. Funchal 2		1300	4506	[4600;4800]	-94
Bica da Cana	Ponta do Sol	1600	5099	[≥5000]	99
Deserta Grande	Santa Cruz	10	3860	[≥5000]	-1140
Encumeada	São Vicente	1017	3829	[4400;4600]	-571
Machico	Machico	170	4290	[4200;4400]	90
Pico das Pedras	Santana	920	3722	[4200;4400]	-478
Porto Moniz	Porto Moniz	675	3610	[4200;4400]	-590
Prazeres	Calheta	648	4285	[4400;4600]	-115
Pico Verde		1020	5035	[≥4800]	235

Anexo A.5.3 - Caracterização dos desvios apresentados

EMAs que apresentaram uma média anual menor que o intervalo indicado pelo Atlas para o local, com um desvio inferior a 750 Wh/m².dia									
Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m².dia)	Média Anual da ISGD no "Atlas da Radiação Solar" (Wh/m².dia)	Δ ISGD (Wh/m².dia)	
Santana	IPMA	SP Lite 2	5	0,0%	< a 2% ao ano	3413	[4000;4200]	-587	
São Vicente			5	0,0%		3613	[4000;4200]	-387	
Pico das Pedras	LREC	SP Lite	6	15,7%		3722	[4200;4400]	-478	
P.E.Funchal 2			5	1,6%		4506	[4600;4800]	-94	
P.E.Funchal			9	20,9%		3980	[4600;4800]	-620	
Porto Moniz			10	22,4%		3610	[4200;4400]	-590	
Trapiche			4	35,5%		3663	[4400;4600]	-737	
Prazeres			5	42,7%		4285	[4400;4600]	-115	
Pta. São Lourenço	IPMA	CM 11	6	1,2%	< a 5%	4493	[4600;4800]	-107	
São Jorge			14	7,6%		4079	[4200;4400]	-121	
Aero. Porto Santo			12	8,2%		4895	[≥ 5000]	-105	
Quinta Grande		EP08	5	0,0%	< a 2% ao ano	3654	[4400;4600]	-746	
Encumeada	LREC	CM3	10	5,4%	< a 2% ao ano	3829	[4400;4600]	-571	

EMAs que apresentaram uma média anual menor que o intervalo indicado pelo Atlas para o local, com um desvio superior a 1000 Wh/m².dia

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m².dia)	Média Anual da ISGD no "Atlas da Radiação Solar" (Wh/m².dia)	ΔISGD (Wh/m².dia)
Desertas	LREC	SP Lite	10	1,3%	< a 2% ao ano	3860	[≥ 5000]	-1140
Bica da Cana	IPMA	EP08	6	0,0%		3847	[≥ 5000]	-1153
Santo da Serra			5	2,8%		3121	[4200;4400]	-1079

EMAs que apresentaram uma média anual dentro ou acima do intervalo indicado pelo Atlas para o local, com um desvio inferior a 300 Wh/m².dia

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m².dia)	Média Anual da ISGD no "Atlas da Radiação Solar" (Wh/m².dia)	ΔISGD (Wh/m².dia)
Bica da Cana	LREC	SP Lite	10	9,1%	< a 2% ao ano	5099	[≥ 5000]	99
Pico Verde	LREC	SP Lite	10	10,2%	< a 2% ao ano	5035	[≥ 4800]	235
Machico	LREC	SP Lite	7	11,5%	< a 2% ao ano	4290	[4200;4400]	90
Ponta do Pargo	IPMA	CM 11	9	3,9%	< a 5%	4964	[4600;4800]	164
Lugar de Baixo	IPMA	CM 11	13	6,9%	< a 5%	4752	[4400;4600]	152
Chão Areeiro	IPMA	CM 11	12	9,4%	< a 5%	4976	[4800;5000]	176
Lombo da Terça	IPMA	CM 11	6	9,5%	< a 5%	4057	[≤ 4200]	-143
Observatório	IPMA	CM 11	13	9,6%	Recalibrado	4462	[4200;4400]	62
Lido	IPMA	EP08	12	6,4%	< a 2% ao ano	4496	[4400;4600]	96
LREC	LREC	CM3	10	3,4%	< a 2% ao ano	4598	[4200;4400]	198

Anexo A.5.4 - Análise global

Estação	REMA	Modelo	Anos de Funcionamento	% de lacunas de dias	Quebra de Sensibilidade	Média Anual da ISGD "Registos" (Wh/m².dia)	Atlas		PVGIS
							ΔISGD (Wh/m².dia)	ΔISGD (Wh/m².dia)	
Santana	IPMA	SP Lite 2	5	0,0%	< a 2% ao ano	3413	0	-907	
São Vicente			5	0,0%	< a 2% ao ano	3613	0	-1027	
Desertas	LREC	SP Lite	10	1,3%	< a 2% ao ano	3860	-1140	-880	
Bica da Cana			10	9,1%	< a 2% ao ano	5099	99	29	
Pico Verde			10	10,2%	< a 2% ao ano	5035	235	105	
Machico			7	11,5%	< a 2% ao ano	4290	90	-770	
Santana			6	15,7%	< a 2% ao ano	3722	-478	-448	
P.E.Funchal 2			5	1,6%	< a 2% ao ano	4506	-94	-4	
P.E.Funchal			9	20,9%	< a 2% ao ano	3980	-620	-530	
Porto Moniz			10	22,4%	< a 2% ao ano	3610	-590	-800	
Trapiche			4	35,5%	< a 2% ao ano	3663	-737	-1527	
Prazeres			5	42,7%	< a 2% ao ano	4285	-115	-895	
Aero. Sta. Catarina	IPMA	CM 11	0.75	0%	Calibrado				
Pta. São Lourenço			6	1,2%	< a 5%	4493	0	-407	
Ponta do Pargo			9	3,9%	< a 5%	4964	0	264	
Lugar de Baixo			13	6,9%	< a 5%	4752	0	-348	
São Jorge			14	7,6%	< a 5%	4079	0	-311	
Aero. Porto Santo			12	8,2%	< a 5%	4895	0	-335	
Chão Areeiro			12	9,4%	< a 5%	4976	0	186	
Lombo da Terça			6	9,5%	< a 5%	4057	0	-933	
Observatório			13	9,6%	Recalibrado	4462	0	-538	

Continuação... Anexo A.5.4 - Análise global

Pico Alto	IPMA	EP08	0.75	0,0%	calibrado	3847	0	
Bica da Cana								
Quinta Grande								
Porto Moniz								
Santo da Serra								
Lido								
LREC	LREC	CM3	10	3,4%	4598	198	-522	
Encumeada			10	5,4%	3829	-571	-881	